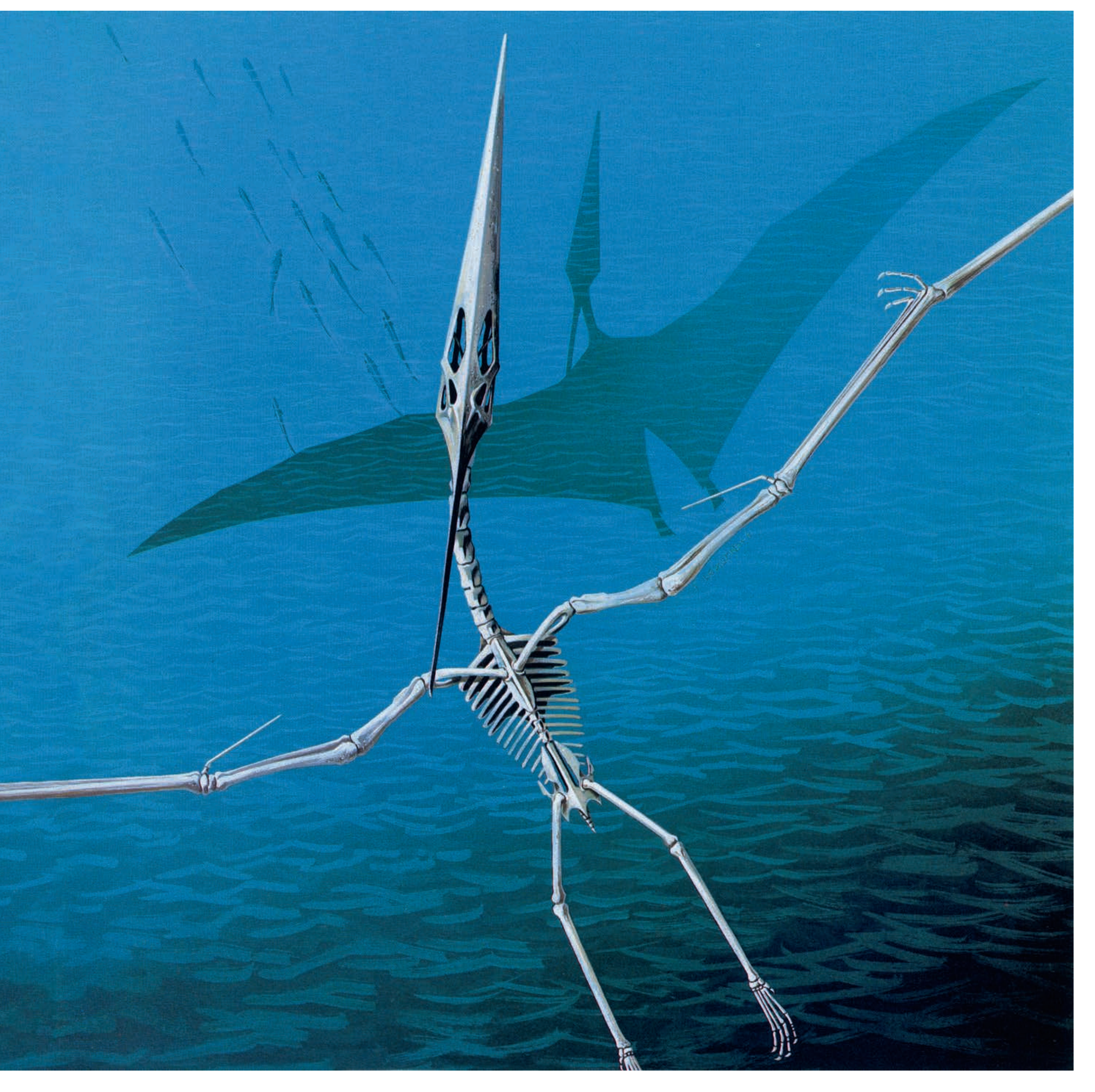
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



PTEROSAURIOS

Abril 1981

250 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 55
Abril 1981



EDITA: Prensa Científica S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

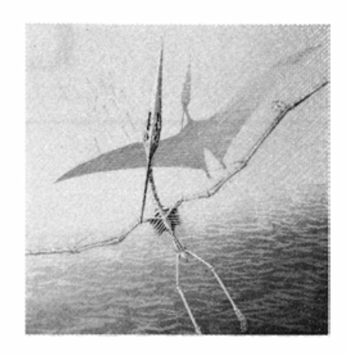
Ramón Carreres: *El cultivo del arroz en California;* Lluís Cornudella: *El nucleosoma;* Cristóbal Mezquita: *Enfermedades por autoinmunidad;* Manuel Puigcerver: *Los ciclos de actividad de las estrellas;* Joandomènec Ros: *Pterosaurios;* Manuel Puigcerver: *Un telescopio de neutrinos en las profundidades marinas;* Antonio Blanco Freijeiro: *Las esculturas Nok de Nigeria;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Pascual Cuñat, A. Aguilar, V. García y Antonio Alabau

Libros:

Julio Samsó, Jordi Vives y Joandomènec Ros



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra el esqueleto de *Pteranodon,* un reptil volador de la era Mesozoica y uno de los mayores representantes del extinguido orden Pterosaurios (véase "Pterosaurios", de Wann Langston, Jr., en este mismo número). Las cavidades del hueso del cráneo son un buen ejemplo de la tendencia a reducir el peso del animal. Los propios huesos eran delgados y huecos. De las adaptaciones evolutivas al vuelo, la más espectacular era el cuarto dedo del miembro anterior, muy alargado, que se convertía en el principal puntal del ala. Los otros tres dedos de cada mano eran típicamente reptilianos: cada uno de ellos tenía una garra en su extremo. La superficie del agua bajo el esqueleto sugiere un viento de unos 15 km por hora. Esta velocidad viene a ser la máxima brisa en la que *Pteranodon* podía mantener el control de su vuelo, lento y a menudo planeado, mientras escudriñaba el agua en busca de peces.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.°, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
7	Scientific American
8-9	Issa Katime y J. A. Pérez Ortiz
10	Scientific American
11-14	Miguel Alonso
16-18	Jon Brenneis
19	Ilil Arbel (*arriba*), Jon Brenneis (*abajo*)
20-25	Jon Brenneis
29	Susan Stallman y Zacheus Cande, Universidad de California en Berkeley (*arriba*); Joseph G. Gall, Universidad de Yale (*medio*); George Lefevre, Universidad estatal de California en Northridge (*abajo*)
30	George V. Kelvin (*arriba y abajo a la derecha*), Roger D. Kornberg (*abajo*)
31	George V. Kelvin (*arriba*) Ada L. Olins y Donald E. Olins (*abajo*)
32	Roger D. Kornberg (*arriba y abajo*), George V. Kelvin (*medio*)
33	Roger D. Kornberg
34	Aaron Klug
35-37	George V. Kelvin
38-39	Fritz Thoma y Theo Koller, Instituto Politécnico Federal Helvético
40	George V. Kelvin
53	C. Lynn Burek, Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Wayne
54-57	Bunji Tagawa
58	David R. Davies, National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases; B. Tagawa (*arriba*)
59-61	Bunji Tagawa
62	Noel R. Rose
63	Bunji Tagawa
67-70	Walken Graphics
71	T. Cragg, Observatorios Monte Wilson y Las Campanas
72-73	Walken Graphics y Observatorio del Monte Wilson
74-76	Walken Graphics
80-81	Tom Prentiss
82	Fritz Goro
83-87	Tom Prentiss
88	Peter Wellnhofer
89	Tom Prentiss
90	Texas Memorial Museum
93-102	Gabor Kiss
105	Detroit Institute of Arts
106-107	Andrew Tomko
108-109	Bernard E. B. Fagg
110-111	B. E. B. Fagg (*izquierda*), Detroit Institute of Arts (*derecha*)
112	Bernard E. B. Fagg (*arriba*), Detroit Inst. of Arts (*abajo*)
114	Bernard E. B. Fagg
116-118	Ilil Arbel
123	Sam Epstein
124-128	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Fotocromos reproducidos por GINSA, S. A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

ISSA A. KATIME AMASHTA y JUAN A. PEREZ ORTIZ ("Polímeros inorgánicos") trabajan conjuntamente en la Universidad del País Vasco. Katime se licenció en química en la Universidad Complutense de Madrid, donde obtuvo el grado de doctor en 1971. Durante varios años realizó investigación postdoctoral en el Centre de Recherches sur les Macromolécules de Strasbourg (Francia). A su regreso a España, se incorporó al departamento de química física de la Universidad del País Vasco, donde ha continuado sus investigaciones en el campo de la termodinámica de las disoluciones macromoleculares. Ha publicado unos 80 trabajos de investigación en revistas internacionales y nacionales y varios libros; entre estos últimos: *Química Física Macromolecular* y *Termodinámica de los procesos irreversibles. Reacciones oscilantes*. Pérez Ortiz obtuvo su licenciatura en química física en la Universidad del País Vasco (1976). Desde entonces ha venido colaborando estrechamente con el profesor Katime en diversos temas de investigación, lo que se ha traducido en la publicación de varios artículos científicos.

J. NEIL RUTGER y D. MARLIN BRANDON ("El cultivo del arroz en California") son investigadores agrícolas que comparten un interés común por la mejora del arroz. Rutger ocupa un puesto directivo en la Rice and Oilseeds Genetics and Breeding Station (adscrita al Ministerio de Agricultura estadounidense) de la Universidad de California en Davis. Se formó en la Universidad de Nebraska, donde se recibió de doctor en genética en 1964. Durante seis años, enseñó en la Universidad de Cornell, incorporándose al claustro universitario de Davis en 1970. Brandon es profesor de la Rice Experiment Station de la Universidad estatal de Louisiana.

ROGER D. KORNBERG y AARON KLUG ("El nucleosoma") han contribuido decisivamente a la comprensión de la estructura de la cromatina, el material cromosómico de los organismos superiores. Kornberg profesa biología estructural en el Centro Sherman Fairchild, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. Químico de formación, empezó su carrera universitaria en la Universidad de Harvard, concluyéndola en la de Stanford. De 1972 a 1975 estuvo en el Laboratorio de Biología Molecular del Medical Research Council en Cambridge, Inglaterra. De regreso a los Estados Unidos, enseñó química biológica en Harvard; en 1978 se trasladó a la facultad de Stanford. Klug es director adjunto de la división de estudios estructurales en el Laboratorio de Biología Molecular del MRC.

NOEL R. ROSE ("Enfermedades por autoinmunidad") es profesor y director del departamento de inmunología y microbiología de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Wayne. Se licenció en ciencias por la Universidad de Yale, doctorándose por la de Pennsylvania. Es también licenciado en medicina por la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo.

OLIN C. WILSON, ARTHUR H. VAUGHAN y DIMITRI MIHALAS ("Los ciclos de actividad de las estrellas") son astrónomos. Wilson, que estudió en la Universidad de California en Berkeley y en el Instituto de Tecnología de California, pasó toda su carrera profesional en el Observatorio del Monte Wilson. Desde su jubilación, en 1975, ha continuado trabajando como observador astronómico, especializándose en diversos aspectos de las cromosferas estelares. Vaughan es astrónomo de plantilla en los Observatorios del Monte Wilson y de Las Campanas, en Chile. Estudió ingeniería física en la Universidad de Cornell y prosiguió, hasta obtener su doctorado en física y astronomía en 1946, en la Universidad de Rochester. Ese mismo año se le concedió una beca postdoctoral en el Monte Wilson, de cuyo personal entró a formar parte en 1967. Mihalas está en el Observatorio del Pico Sacramento, en Nuevo México. Estudió en la Universidad de California en Los Angeles y en el Instituto de Tecnología de California. Ha enseñado en cierto número de universidades de los Estados Unidos y Gran Bretaña y detenta la plaza de profesor adjunto de astrogeofísica en la Universidad de Colorado en Boulder.

WANN LANGSTON, JR. ("Pterosaurios") dirige el laboratorio de paleontología de vertebrados del Texas Memorial Museum, división de la Universidad de Texas en Austin, donde enseña geología. Escribe: "Como director del laboratorio de paleontología de vertebrados del museo, tengo a mi cargo los ejemplares de *Quetzalcoatlus* procedentes del Parque Nacional Big Bend (que fueron recolectados con la autorización que confiere la Antiquities Act del Departamento del Interior de los Estados Unidos) y he participado activamente en la reconstrucción de los grandes pterosaurios desde su mismo descubrimiento, en 1971". Langston desea reconocer la colaboración de Douglas A. Lawson, Kevin Padian, James Brower, Peter Wellnhofer y John McMasters en la preparación de este artículo.

JOHN G. LEARNED y DAVID EICHLER ("Un telescopio de neutrinos en las profundidades marinas") son físicos dedicados a la preparación del experimento DUMAND (*D*eep *u*nderwater *m*uon *a*nd *n*eutrino *d*etector, detector de neutrinos y muones en las profundidades marinas). Learned enseña física en la Universidad de Hawai, cedido por la de Wisconsin. Se formó en las universidades de Columbia, Pennsylvania y Washington. Eichler, profesor adjunto de astronomía en el College Park adscrito a la Universidad de Maryland, está disfrutando de una beca de investigación Alfred P. Sloan.

THURSTAN SHAW ("Las esculturas Nok de Nigeria") es profesor de arqueología en la Universidad de Cambridge. Nacido en Devon, estudió arqueología y antropología en Cambridge, alcanzando honores de primera clase en 1936. Tras un curso de postgraduados en educación colonial, en la Universidad de Londres, se incorporó al personal del Achimota College, en Costa de Oro (la actual Ghana), en 1937, y trabajó como conservador del museo antropológico de aquella localidad hasta 1945, año en que volvió a Cambridge. En 1958 fue invitado por el director del Departamento Federal de Antigüedades de Nigeria para excavar el yacimiento de Igbo-Ukwu, en Nigeria oriental, lo que hizo en 1959-60 y otra vez en 1964, tras ser nombrado profesor de investigación de arqueología de la Universidad de Ibadan. Se jubiló en 1974, estando en la Universidad de Ibadan, pero regresó para realizar tres campañas de trabajos de campo (1976-78) bajo los auspicios de la Universidad de Ahmadu Bello. Le fue concedido el grado de doctor por Cambridge en 1967 en mérito a sus trabajos publicados. Shaw quisiera agradecer a Bernard E. B. Fagg y a Joseph Jemkur la ayuda que le prestaron.

Hace...

José M.ª López Piñero

... trescientos años

Falleció en Roma Sebastián Izquierdo, uno de los escasos españoles del siglo XVII que realizaron aportaciones de relieve al desarrollo de la metodología científica y de las matemáticas.

Nació en la localidad albaceteña de Alcaraz en 1601 e ingresó en la Compañía de Jesús el año 1623. Fue profesor de filosofía y de teología en los colegios jesuiticos de Alcalá de Henares y de Murcia desde 1641 hasta 1661, fecha en la que fue nombrado asistente del Prepósito General de su orden. En consecuencia, se trasladó a Roma, donde residió los veinte últimos años de su vida.

En 1659 apareció su más importante obra, titulada *Pharus scientiarum.* Su contenido, como han demostrado los estudios de Ramón Ceñal, corresponde a un escolasticismo abierto a las corrientes modernas. La finalidad principal del libro es exponer una "scientia de scientia", en el sentido de la tradición de inspiración luliana. Dicha tradición había tenido una gran influencia entre los miembros de la Academia de Matemáticas de Madrid, a finales del siglo anterior, y continuó pesando durante la centuria barroca a través de varias vías, una de las cuales culminaría en la obra de Leibniz. Izquierdo entiende expresamente el "ars generalis" como "método científico" e intenta "restaurar, ilustrar, completar y liberar de defectos" al *Organon* aristotélico. Considera que es incompleto porque solamente reglamenta la facultad intelectiva, siendo necesario hacerlo también con la memoria, la imaginación y la experiencia sensorial.

Sobre esta base tradicional, Izquierdo incorpora varios supuestos centrales de la ciencia moderna. Distingue entre la física y la metafísica como grandes órdenes del saber, defiende que la experiencia y la observación son los fundamentos de todo conocimiento y propugna que su desarrollo y exposición se realicen "more geometrico et arithmetico". Acepta las reglas de Bacon, pero estima que sus ocho modos pueden completarse con "otros muchos casi infinitos". Propone diez "instrumentos" del conocimiento científico: observación, composición, división, definición, locación, combinación, argumentación, traslación, memoración y tradición. La combinación es el más útil para construir una "scientia de scientia", cuyo objeto es "el conocimiento asequible al hombre".

Por todo ello, la "Disputatio XXIX. De combinatione" –recientemente reeditada y traducida al castellano por Ceñal– es la parte más importante del *Pharus scientiarum.* Izquierdo ofrece en ella una exposición bastante completa de la combinatoria que incluye algunas exposiciones originales. Entre estas últimas, Víctor Navarro ha destacado una formulación para las variaciones ($V^q_p = C^q_p \cdot P_q$), una regla correcta para obtener las combinaciones con repetición y, sobre todo, una de las primeras aplicaciones del triángulo aritmético al cálculo combinatorio. Esta última aportación, que realizó con independencia de Pascal, la expuso en los siguientes términos:

"17. Mas para hallar los ternarios, los cuaternarios, los quinarios y los demás agregados, y aun también para los mismos binarios, de cualquier número dado de términos, sobre los cuales nada se encuentra en los Autores, sea la regla general y muy excelente la siguiente. Hágase una tabla de cuadrados, tal como la construida a continuación; y en su primera columna transversal A póngase la progresión natural aritmética de los números 1.2.3.4.5, etc. Después, en la segunda columna, también transversal, B póngase la unidad en todos sus cuadrados. Asimismo, en la tercera columna transversal C, comenzando del número 2, póngase también la progresión natural, 2.3.4.5, etc. A su vez, en la primera columna descendente D, comenzando desde la unidad del segundo cuadrado, hágase descender la progresión natural aritmética, 1.2.3.4.5, etc. Hecho esto, los números que se han de poner en los cuadrados de la segunda columna descendente E, se hallarán de esta manera. Súmense el cuarto número de la columna D y el tercero de la columna E, que son 3 y 3, y póngase la suma (6) en el cuarto cuadrado de la columna E. El cual número 6, sumado, a su vez, con el número del quinto cuadro de la columna D, que es el 4, dará el número 10, que es el que se ha de poner en el quinto cuadrado de la columna E; y así se procederá después indefinidamente, sumando siempre el último número hallado de la columna E con el número del cuadro inmediatamente inferior de la columna D, y poniendo la suma de ambos inmediatamente debajo del mismo de la columna E y junto al mismo número de la columna D, que han sido sus sumandos. Del mismo modo se hallarán los números que se han de poner en los cuadrados de la tercera columna descendente F, esto es, sumando el número cuarto de la segunda columna E con el tercero de la columna F, y colocando la suma, que es el número 10, en el cuarto cuadrado de la misma columna F, y así después descendiendo por los cuadrados sucesivos. Del mismo se procederá en todas las columnas siguientes. Con lo cual se podrá extender la tabla hasta el infinito. Una vez construida de la manera dicha, desde los cuadrados de la primera columna descendente D trácense líneas transversales o cuasi diametrales hasta los cuadrados de la primera columna transversal A, comenzando desde el cuarto cuadrado de la columna D, como puede verse en la tabla. Y así toda su construcción estará acabada para hacer patente nuestro propósito...

19. El uso de esta tabla (la cual, como dijimos, puede extenderse indefinidamente) es el siguiente. Sea el número dado de términos, por ejemplo, 8, del cual se quiere hallar el número de quinarios, que se pueden hacer de él: búsquese el número 8 en la primera columna descendente D, y el número 5 en la primera columna transversal A, y véase en qué cuadrado de los que debajo del número 5 descienden por su misma columna concurra la línea diagonal trazada desde dicho número 8: ese cuadrado dará el número de los quinarios, que se pueden hacer de ocho términos, que son 56. Del mismo modo se hallarán los binarios, los ternarios, los cuaternarios, etc., posibles de cualquier número da-

do en términos: buscando siempre en la columna D el número de términos, y en la columna A el número designante (exponente) la combinación buscada: si es el de los binarios, el número 2, si el de los ternarios, el número 3, si el de los cuaternarios, el número 4, etc., y viendo en qué cuadrado de la columna descendente bajo el número designante la combinación concurra la línea diagonal trazada desde el número de los términos: tal cuadrado dará el número de las combinaciones."

La "Disputatio de combinatione" fue utilizada por científicos españoles del siglo XVII de mentalidad renovadora, como Juan Caramuel y Tomás Vicente Tosca. También lo hicieron otros extranjeros, entre ellos el alemán Athanasius Kircher, que sirvió de puente para que Leibniz conociera el libro de Izquierdo, que citó en varios escritos posteriores a la publicación de su obra *De Arte Combinatoria* (1666).

Izquierdo reconoce las limitaciones del método que ha expuesto. De los conceptos de "universalidad suma" no pueden deducirse las "verdades particulares", que deben ser investigadas por las "ciencias concretas". Por otra parte, encuadra esta epistemología en una concepción del microcosmos humano contenido en el macrocosmos del universo y con la comunidad política como intermedio.

Ya en Roma, Izquierdo publicó un *Opus theologicum* ("Escritos teológicos") en dos volúmenes (1664-1670) que incluye algunos estudios de cuestiones de filosofía natural.

Disp.XXIX. De Combinatione, Quæst. II. 323

TABVLA II.

18 *Determinans omnes binarios, ternarios, quaternarios, &c. ex quovis numero terminorum dato posibiles, penes differentiam solius substantiæ.*

	D	E	F							
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66
	4	10	20	35	56	84	120	165	220	286
	5	15	35	70	126	210	330	495	715	1001
	6	21	56	126	252	462	792	1287	2002	3003
	7	28	84	210	462	924	1716	3003	5005	8008
	8	36	120	330	792	1716	3432	6435	11440	16448
	9	45	165	495	1287	3003	6435	12870	24310	33758
	10	55	220	715	2002	5005	11440	24310	48620	82378

Triángulo aritmético. Página del **Pharus scientiarum** *(1659), de Sebastián Izquierdo, correspondiente a la "Disputatio de combinatione"*

Polímeros inorgánicos

La mayoría de los polímeros de uso comercial son macromoléculas provistas de átomos de carbono en su esqueleto. Se están descubriendo nuevas familias de polímeros sin carbono que integran materiales dotados de propiedades únicas

Issa Katime Amashta y J. A. Pérez Ortiz

Los productos de la química de altos polímeros llenan una lista casi interminable, que abarca desde ropas y envases hasta neumáticos, pasando por pinturas y colas. La mayoría son orgánicos, es decir, portan átomos de carbono en su esqueleto. Pero es un hecho que muchos polímeros orgánicos presentan serias deficiencias que los inhabilitan para ciertas aplicaciones. Muy pocos resisten calentamientos superiores a los 425 grados Kelvin, sin que se fundan o descompongan. A veces, la degradación viene por reacción de los átomos de carbono con el oxígeno de la atmósfera, por lo que no resisten la intemperie. Muchos se disuelven en líquidos orgánicos calientes, o en aceites, lo que impide su posible uso en motores. Hay muy pocos que mantengan su flexibilidad por encima o por debajo de una temperatura crítica dada. No sirven para la industria astronáutica, donde se requiere resistencia a la radiación, ni para la textil (tejidos ininflamables) ni en medicina (órganos artificiales).

Esas objeciones se resuelven en parte con los polímeros inorgánicos, dotados en su esqueleto estructural de átomos distintos del carbono. Si variamos la estructura de los grupos laterales de una macromolécula inorgánica o introducimos otros átomos podremos conseguir una amplia variedad de materiales con un enorme rango de propiedades diferentes. Pero ello no es tan fácil.

Algunos polímeros inorgánicos se han venido usando desde hace mucho tiempo. El vidrio, por ejemplo. Se trata de un polímero constituido por anillos y cadenas de unidades de silicato, de vastísima y explotada aplicación por su gran flexibilidad: en tejidos, pértigas de atletismo, conductores de luz, etcétera. Cadenas semejantes pueden hallarse en minerales como los piroxenos, anfiboles y amiantos o asbestos. La mayoría de los ladrillos y cerámicas son polímeros inorgánicos tridimensionales, si bien su campo de aplicación es limitado por dificultades de manejo a altas temperaturas. Ni puede decirse que sean elásticos o resistentes al choque. De todos esos polímeros, de su naturaleza, estructura química y geométrica y de su preparación vamos a ocuparnos.

En química, se llama polímero la molécula constituida por repetición de sus unidades estructurales. Esas unidades recurrentes reciben el nombre de monómeros. Dímero es la agrupación formada por la unión de dos monómeros; trímeros, la unión de tres; de cuatro, tetrámeros; de diez, decámeros. Cuando se habla de agrupaciones superiores suele optarse por el término general de polímero. Cuando las unidades estructurales pertenecen a la misma clase, se prefiere el término homopolímero y, copolímero, si son de clase distinta.

Abundan los polímeros naturales orgánicos: la celulosa y el almidón, por ejemplo, que son polisacáridos constituidos por adición de muchas moléculas de glucosa. Entre los polímeros inorgánicos naturales tenemos la sílice, que es un polianhídrido de estructura tetraédrica, presente en más del 60 por ciento de la litosfera. Esa abundancia natural de este tipo de macromoléculas ha explicado su estudio desde hace tiempo. Lo que no impide que, en parte también, constituya un campo nuevo, si por tal entendemos el nivel de conocimientos a que se ha llegado mediante la aplicación de nuevos métodos y técnicas. Añádase a ello el explosivo desarrollo tecnológico de ciertos polímeros, como el caso de las siliconas, que ha implicado una mayor investigación teórica fundamental de la naturaleza y propiedades de esos compuestos: su resistencia al calor, a la oxidación y a la hidrólisis. Sirva de ejemplo el de los compuestos del boro usados en fuseología, que ha arrastrado una serie larga de estudios de su química, tan poco desarrollada que sólo hasta fecha muy reciente no se ha conseguido determinar las estructuras de los hidruros de ese elemento.

Por estructura molecular se entiende el conjunto de características químicas y geométricas que distinguen a una molécula. Entre las características químicas se cuentan el tipo de enlace y los orbitales implicados; entre las geométricas, la disposición de los átomos en la molécula y la de los enlaces. Constituyen un todo unitario. Aunque el principio de indeterminación de Heisenberg prohíbe una medición directa y exacta de todas y de cada una de las propiedades, sí pueden deducirse indirectamente a través del método de difracción de rayos X, para longitudes de onda del orden de las distancias interatómicas, y del método de luz visible, para longitudes de onda del espectro óptico.

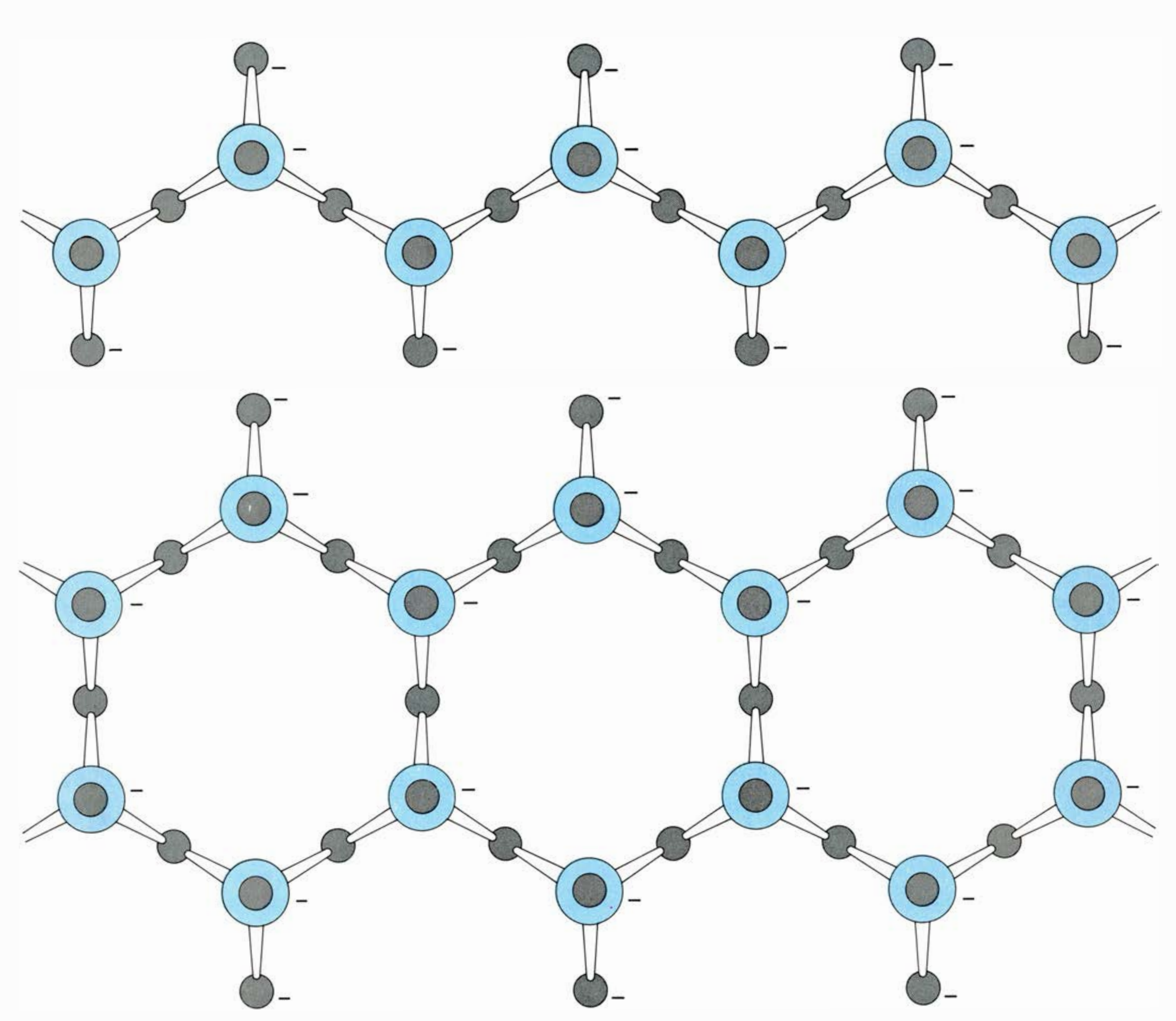
Existen varios modelos para predecir la geometría que adoptan las moléculas. En uno de ellos, la teoría subyacente recurre al concepto de hibridación de los orbitales atómicos, es decir, al fenómeno que consiste en la combinación de dos o más orbitales atómicos –funciones de onda– para formar uno solo. Las funciones de onda se obtienen de la ecuación de Schrödinger, llamada así en honor del físico austriaco de la primera mitad de nuestro siglo Erwin Schrödinger. Empleada en mecánica ondulatoria para describir el comportamiento de una partícula, la ecuación afirma que el producto de la energía de un sistema por la función de onda equivale al producto de los valores propios obtenibles espectroscópicamente por dicha función de onda. La energía del sistema se expresa mediante una función cuyo desarrollo matemático precisa conocer la energía potencial del sistema; y para determinar el valor de esa energía hay que conocer las interacciones que existen en el sistema, tema sumamente complejo e inaccesible hoy por hoy.

Otro método, más intuitivo y menos exacto también, fue el iniciado por

Sidgwick y Powell, que Gillespie perfeccionó. Usa la teoría de los electrones de valencia y se basa en la mutua repulsión de los pares de electrones; el electrón de valencia es el que está en la capa más externa de un átomo y es el que participa en los enlaces químicos cuando el átomo forma compuesto. Pero al enlazarse covalentemente con otro, un átomo no emplea siempre todos los electrones de la última capa; es decir, podemos hallar, en una molécula, electrones apareados y otros no. En virtud de la ley de Coulomb, los electrones se repelen electrostáticamente; por ello, los enlaces que son pares de electrones se dispondrán en el espacio de suerte que su repulsión sea mínima. A la hora de evaluar las repulsiones es preciso tener en cuenta también los pares no enlazantes. Para Gillespie, la repulsión causada por un par no apareado es mayor que la causada por un par enlazante. En el caso del agua, que en estado líquido es un polímero formado por una mezcla de moléculas $(H_2O)_n$, llamadas polihidroles, nos encontramos con una geometría casi tetraédrica donde el ángulo HOH mide 105 grados, en lugar de 109 grados 28 minutos de arco que es lo que le correspondería; ello se debe a una mayor repulsión de los pares no enlazantes de los electrones del oxígeno.

De acuerdo con este segundo modelo, en la predicción de la geometría se ha de considerar también el impedimento estérico, dificultad con que topa una reacción ante la interferencia espacial de los grupos que intervienen, las variaciones vibracionales y, en el estado gaseoso, las rotacionales. La teoría de Gillespie obtiene buenos resultados con los elementos representativos, y no tan buenos para los metales de transición (familia del escandio y del titanio, por ejemplo) y las llamadas tierras raras (lantano, cerio, europio y otros); aunque para los dos últimos tipos de elementos no existe ninguna teoría completamente satisfactoria. En este modelo no se emplea el concepto de hibridación y se obvían los problemas matemáticos que conlleva, lo que parece justificado si pensamos en que los altos puntos de fusión de los polímeros inorgánicos hacen presumir la ausencia en ellos de hibridación.

Forman polímeros inorgánicos el boro (B), el aluminio (Al), el silicio (Si), el fósforo (P), el nitrógeno (N), el germanio (Ge) y todos los metales de transición. Es imposible postular reglas fijas sencillas sobre valencia y estructura molecular de los metales de transición, como revela el examen de cual-



CADENAS Y ANILLOS INORGANICOS, según se presentan en determinadas clases de minerales. Aportan modelos muy útiles para el químico macromolecular. Los minerales de piroxeno (*arriba*) constituyen polímeros de una sola cadena, donde los átomos de oxígeno y silicio se van alternando en su secuencia. Los minerales anfibólicos (*abajo*) poseen una estructura en doble cadena. La geometría depende de la disposición de los átomos y de los enlaces.

CLASE	SUBCLASE	FORMULA	EJEMPLO
Cadenas sin ramificaciones	neutras	$(-Si(CH_3)(CH_3)-O-)_x$	Siliconas
	Neutras terminadas en aniones	$F^-(SbF_4)_xF^-$	Polifluoruro de antimonio
	Polianiones	$(-P(O^-)(=O)-O-)_x$	Polifosfatos
Cadenas predominantemente ramificadas	neutras	$(-As(F)-O-)_x$	Polioxifluoruros arsénicos
	aniónicas	$(-P(S)(=S)-S-)_x$	Polifosfotioatios
Cadenas de anillos on átomos alternantes	neutras	(—Ø Ø —Si—O— Si—O— O O —Si—O— Si—O— Ø Ø)$_x$	Polimonofenilsiloxano
Cadena con varios átomos distintos en idéntica secuencia	neutras	$(-P(O)(Ø)-O-Ø-O-)_x$	
	aniónicas	$(-Cu(CN^-)-C\equiv N-)_x$	
Cadenas irregulares con varios átomos distintos	aniones rectos	$(-P(O)(=O)-O-\ -As(O^-)(=O)-O-)_x$	poliarsenatofosfato
	cadenas lineales	$Cl-Ge(CH_3)_2-(O-Si(CH_3)_2-)_x O-Ge(CH_3)_2-CL$	
	cadenas ramificadas	$Cl_2P-O-(Si(CH_3)(O_3-PCl_2)-O-)_x PCl_2$	
Polímeros en láminas con idénticas capas	Planares, no ionizados		$[Alf_4]^-$
	Capas corrugadas, no ionizadas		Fósforo negro
	Capas corrugadas, ionizados		Silicatos laminares, como la mica
	En forma de ondas, ionizados		Trivanadato de potasio
	Al azar no ionizados		P_2O_5 cristalino
Polímeros en láminas con capas distintas		S_2M_0	
Estructuras tridimensionales	Moléculas neutras, con cavidades pequeñas		las formas de la sílice
	Moléculas neutras o ionizadas, con cavidades e irregularidades de varios tamaños		Vidrios de silicatos y boratos
	Moléculas ionizadas con grandes cavidades		Zeolitas

quier ejemplo de ellos: el cromo, verbigracia, tiene seis estados de oxidación frente a una valencia típica de los elementos representativos. El escaso estudio que han merecido esos metales se explica por la propia singularidad y complejidad.

Aquí, llamaremos polímero inorgánico a aquel cuya unidad estructural fundamental contenga como integrante de su cadena principal al menos un 50 por ciento de átomos distintos del carbono y que, en disolución, no pierda su estructura. Se hace precisa esta última parte de la definición para dejar fuera muchas sustancias cristalinas; los cristales de sal común se reducen a cloruro sódico monomérico cuando se funden o disuelven. Conviene precisar, asimismo, que la química de los polímeros orgánicos se centra en los enlaces covalentes y las propiedades físicas y químicas a ellos asociadas. Sin embargo, en los polímeros inorgánicos aparecen otros tipos de enlace: el enlace iónico o electrovalente (los átomos o grupos de átomos se mantienen unidos por fuerzas electrostáticas entre iones) y el de coordinación o covalente dativo (por compartición de pares de electrones); este último lo observamos sobre todo con elementos de transición.

A pesar de la superioridad numérica de los elementos de la tabla periódica con respecto al carbono, el número de compuestos orgánicos es extraordinariamente mayor que el de los compuestos inorgánicos. La razón admitida es que ello obedece a la capacidad casi única del carbono para enlazarse consigo mismo formando largas cadenas, incluso con una amplia variedad de ramificaciones posibles, aumentando ésta al elevarse el número de átomos de la cadena. Esa característica excepcional del carbono se debe a la energía de disociación, relativamente grande, del enlace C-C. La energía de disociación de dicho enlace se cifra en 347,27 kilojoule por mol.

ENLACES HOMOATOMICOS	ENERGIA KILOJOULE POR MOL^{-1}	ENLACES HETEROATOMICOS	ENERGIA KILOJOULE POR MOL^{-1}
C – C	347,27	B – 0	543,92
S – S	213,38	Si – 0	372,38
0 – 0	138,07	P – 0	351,46
Si – Si	175,73	B – N	418,40
P – P	213,38	P – N	209,20
As – As	213,38	P – C	259,41

ENERGIAS DE ENLACE CARACTERISTICAS. El número de compuestos orgánicos supera, con mucho, el de los compuestos inorgánicos. Ello se debe a la capacidad casi única del carbono para enlazarse consigo mismo formando largas cadenas. Tales cadenas largas pueden albergar una cifra muy alta de átomos, característica excepcional que obedece a la gran energía de disociación del enlace carbono-carbono, C-C, que es de 347,27 kilojoule por mol. Observando la tabla de arriba podría parecer que las cadenas heteroatómicas son más estables incluso que los enlaces homoatómicos C-C de los polímeros orgánicos. Pero ello no es cierto. Y el valor elevado de su energía de enlace obedece a otros factores: la presencia de otros átomos en la cadena en la proximidad del enlace o poca resistencia a la hidrólisis.

La energía que se libera en la disociación de la molécula nos revela que los polímeros inorgánicos son, fundamentalmente, heteroatómicos. Existen, no obstante, dos notables excepciones: el azufre, que en uno de los estados que puede adoptar es un sólido plástico formado por el octámero cíclico S_8, pero que al fundirse se transforma en politio, $(S)_n$, con un gran aumento en su viscosidad, y el fósforo, que puede formar homocadenas, los polifosfanos, de fórmula $(PH)_n$, cuando se polimeriza el bromuro de fósforo, (Br_3P), en presencia de hidruro de litio, (LiH). Esas dos excepciones se explican también por la elevada energía de enlace de los eslabones S-S y P-P: 213,38 kilojoule por mol.

Atendiendo a la gradación de dicha energía podríamos pensar que cadenas heteroatómicas como B-O, cifrada en 543,92 kilojoule por mol, o B-N, de 418,40 kilojoule por mol, ostentarían una estabilidad mayor que las cadenas C-C de los polímeros orgánicos. Pero ello no es cierto, por la razón simple de que intervienen otros factores, como la presencia de otros átomos en la cadena en la proximidad del enlace en cuestión o poca resistencia a la hidrólisis, que es el caso del enlace B-O.

La forma elíptica de las órbitas del electrón en torno al núcleo atómico viene determinada por dos números cuánticos: el número cuántico principal n, del que depende en su mayor parte la energía del electrón y que caracteriza el nivel energético correspondiente, y el número cuántico secundario l que define el momento angular orbital y fija el subnivel energético en cada nivel cuántico. Desde el punto de vista espectroscópico, el número cuántico principal se representa por su valor, pero el número cuántico l viene indicado por las letras *s, p, d, f, g, h,* etcétera, para los valores de l iguales a 0, 1, 2, 3, 4, 5, etcétera, respectivamente. A su vez, los estados electrónicos en la molécula para los cuales el número cuántico secundario vale 0, 1, 2, etcétera, se designan como electrones sigma, pi, delta, etcétera. Es decir, un electrón *s* en un átomo aislado se convierte en un electrón sigma (σ) en el orbital molecular. Así, los orbitales moleculares formados por combinación lineal de los orbitales atómicos *l s,* por ejemplo, se llaman orbitales σ *l s,* siendo el orbital de enlace σ *l s.*

Para un elemento del II período de la tabla de Mendeleiev (donde se inscriben, entre otros, el litio, el berilio, el boro, el carbono, el nitrógeno y el oxígeno), no pueden usarse en el enlace los orbitales *d.* Por tanto, no cabe esperar más de cuatro enlaces sigma por átomo, correspondientes al híbrido sp^3. Si vamos del carbono al flúor, en dicho segundo período, estos elementos tienen suficientes electrones como para donar al menos uno para cada enlace total. Sin embargo, para el B y los compuestos covalentes del Be, existe una deficiencia de electrones, lo que importa tipos de enlace diferentes de los característicos en la química del C, H, N y O. Los átomos tienden a usar todos sus orbitales exteriores, que sean energéticamente asequibles por supuesto, en el enlace. De ahí que se observen estructuras desacostumbradas, cual es el caso de las largas cadenas de dimetilberilio. La interacción electrónica que causa que un grupo metilo, (CH_3), se enlace con dos átomos de Be es un enlace de tres centros, es decir, con solapamiento de tres orbitales, en vez de los dos que es el número corriente en los enlaces sigma.

Enlaces similares de tres centros se dan en el BHB en los hidruros de boro, donde cada enlace abraza a dos átomos de boro y uno de los hidrógenos del puente. Esos hidruros son compuestos también deficientes en electrones de alto peso molecular. Enlaces de múltiples centros se observan en el aluminio y en los metales de transición; en el tetrametil platinato $[(CH_3)_4\ Pt]_4$, tenemos enlaces de cuatro centros, con puentes metilo entre tres átomos de platino, que se hallan demasiado aleja-

GEOMETRIAS MOLECULARES TIPICAS en polímeros inorgánicos. En todos los ejemplos recogidos en la ilustración de la página opuesta se trata de polímeros bien determinados. La utilidad práctica de muchos de ellos es conocida desde antiguo. Así, el vidrio, que está constituido por anillos o cadenas de unidades de silicato, de vastísima aplicación en tejidos, conductos de luz, etc. La mayoría de los ladrillos y cerámicas son polímeros inorgánicos tridimensionales. Para muchos químicos, las propiedades óptimas de los polímeros se hallarán entre materiales que sean completamente inorgánicos y polímeros orgánicos.

dos para permitir un enlace simple Pt-Pt. Se han investigado también los llamados complejos pi, en razón del orbital molecular de esa denominación griega. Al borbotear acetileno o acetilenos monosustituidos en una disolución de sales de cobre se obtiene carburo de cobre-agua, un compuesto de adición de color amarillento, estructura donde los orbitales pi del triple enlace donan electrones, por enlace covalente coordinado, a los orbitales vacíos del cobre.

Para los elementos del tercer período de la tabla periódica, que engloba el sodio, el magnesio, el aluminio, el silicio, el fósforo y el azufre entre otros, y en particular para el Si, P y S, sí son utilizables los orbitales *d* en el enlace, pues poseen una energía suficientemente baja. Cabe la formación de enlaces sigma entre orbitales *d;* no obstante, estos últimos se usan preferentemente en enlaces pi con híbridos sp^3, p^3 y p^2. Los enlaces pi estabilizan las moléculas al evitar grandes separaciones de cargas, que se presentarían en virtud de las diferentes electronegatividades.

Los elementos del V período (rubidio, estroncio, niobio, molibdeno, ytrio, circonio, rutenio, rodio, paladio, plata, estaño, teluro, yodo, etc.), y en particular el Sn, Sb, Te e I, muestran una mayor tendencia a usar orbitales *d* de enlaces sigma, por lo cual es más frecuente una coordinación octaédrica que tetraédrica. También ocurren los enlaces pi.

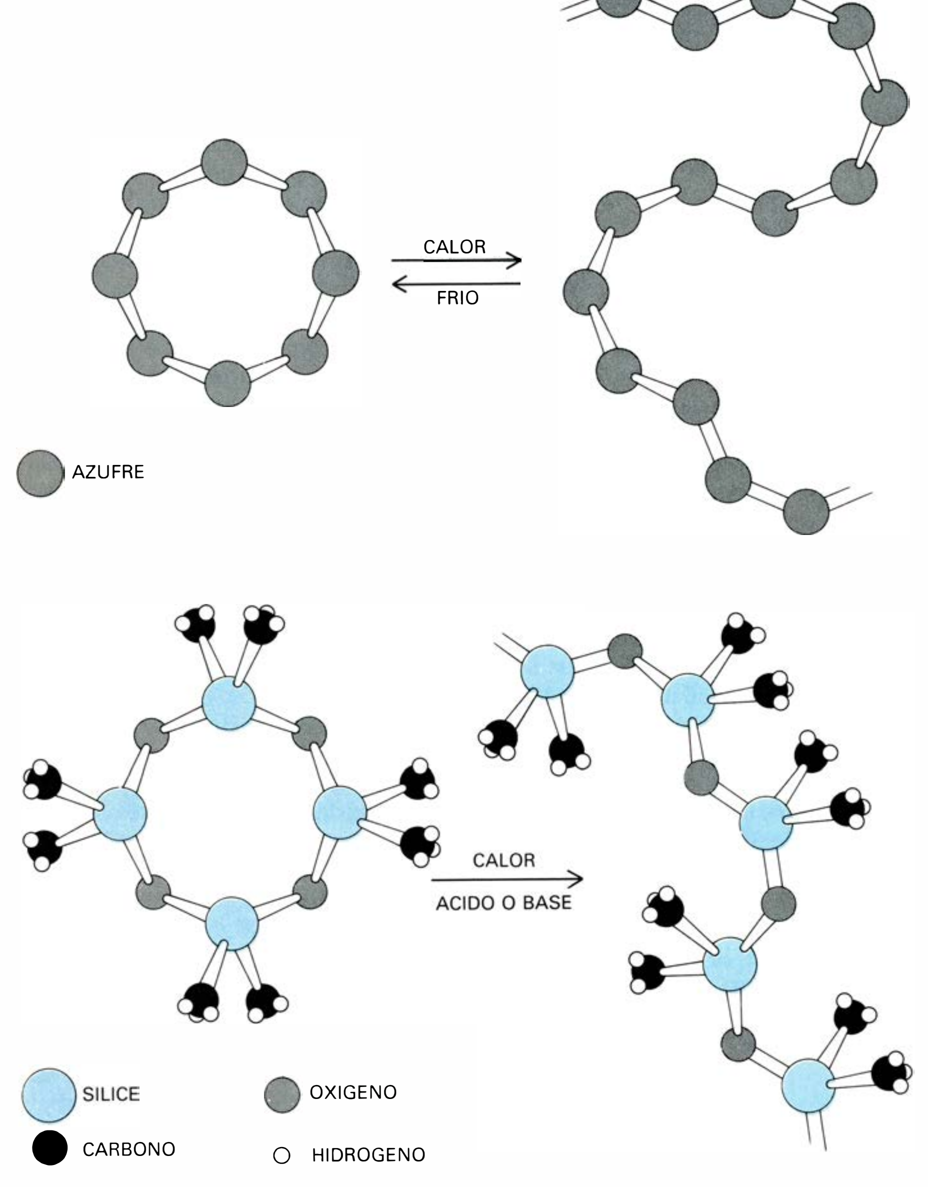
Los elementos del IV período (potasio, calcio, escandio, titanio, vanadio, etcétera), y en particular el germanio, el arsénico y el selenio, ostentan un comportamiento intermedio, si bien sus polímeros son análogos a los del segundo período de la tabla periódica.

Para los metales de transición y tierras raras podemos decir que, con frecuencia, existe equilibrio entre especies moleculares de distinto número de coordinación, entendiendo por tal el número de iones de signo opuesto que envuelven a un ion determinado. Cuando hay un átomo de oxígeno, por ejemplo, formando puente entre dos átomos de metal en configuración tetraédrica, puede ceder uno o quizá los dos pares de electrones no compartidos a un orbital inferior vacante, de uno o de los dos átomos del metal; con ello se aumenta el número de coordinación de dichos átomos aceptores. Se halla así que muchos elementos exhiben números de coordinación poco familiares al químico. Los halógenos (flúor, cloro, bromo, iodo y astato), y en particular el flúor, pueden servir de átomos puente en estructuras moleculares, por lo que se hallarán halógenos monofuncionales y halógenos difuncionales, lo que no ocurre en química orgánica, donde sólo se observan los monofuncionales. Se han encontrado incluso poliácidos de fósforo y wolframio en los que aparecen átomos de oxígeno con cuádruple función.

Esos átomos puente no usuales (oxígeno y halógenos enlazados a tres o cuatro átomos vecinos) pueden hallarse en muchas estructuras estables, como el pentafluoruro de antimonio, $(SbF_5)_n$, estable en condiciones ambiente; en heteropoliácidos y sus sales (de molibdeno, wolframio, vanadio y cromo), estables en atmósfera no reductora y que contienen oxígeno con una funcionalidad superior a su doble normal.

El desplazamiento de sustituyentes de un átomo central está controlado por el átomo vecino más próximo. Las reacciones de sustitución siguen siendo válidas con independencia de que sustituyente y sustituto sean o no monofuncionales. Y el estudio del equilibrio de desplazamiento en reacciones de sustitución arroja mucha luz sobre las estructuras de polímeros.

Llamemos *T* al sustituible, *Q* al medio central, *Z* al sustituto y ν al número de posiciones intercambiables. Los distintos ensamblajes $QT_{\nu-i}Z_i$ representan unidades constitutivas de funcionalidad *i.* Estas unidades estarán en equilibrio entre sí, y existirán las correspondientes constantes para cada equilibrio entre dos valores de *i.* Si esas constantes son muy grandes o muy pequeñas, no coexistirán en cantidad detectable más de dos unidades de funcionalidad diferente. Si son grandes, las únicas confor-



DOS ANILLOS de ocho miembros. Arriba, el anillo característico de los cristales de azufre rómbico. Cuando se calienta por encima de los 140 grados C, el anillo se abre y se une a otros, también rotos, para formar un polímero plástico. Abajo, el primer polímero comercial inorgánico: el caucho silicónico.

maciones serán lineales, no ramificadas. Si son pequeñas, tendremos una mezcla de los ensamblajes con $i = 0$ (sin sustitución, que se llama forma neso) y de los ensamblajes más sustituidos y ramificados (que se llaman formas zeugotácticas).

Cuando sean dos las posiciones intercambiables ($\nu = 2$), y con las constantes grandes, el tratamiento de los equilibrios nos lleva a un proceso de competencia entre cadenas lineales y anillos cíclicos. Si no hay anillos, la dilución no afectará las cadenas; pero si los hay en la disolución, al aumentar la dilución se formarán anillos. En dilución infinita, no habrá cadenas, sino sólo el anillo del mínimo tamaño y la forma neso.

El tamaño de las cadenas viene determinado por los ángulos de enlace y por los efectos estéricos; a ambos aludimos más arriba. Las repulsiones entre pares de electrones, entre enlaces, se complica a medida que se va construyendo la molécula del polímero. En particular, existe lo que se llama rotación impedida de los enlaces, es decir, una barrera energética opuesta por la diferencia de energías entre las distintas conformaciones geométricas de los enlaces. Así como la mayor o menor repulsión depende de la polaridad de los enlaces, la magnitud de las barreras de rotación vendrá dada por la naturaleza de los átomos enlazados para constituir la molécula.

El segundo factor principal que interviene en la determinación de la longitud o tamaño de las cadenas es el impedimento estérico. La estabilidad de las cadenas se ve favorecida por grupos laterales pequeños, que no interfieren entre sí. Cuando se trata de grupos voluminosos, en cambio, la cadena se muestra inestable en virtud de la fuerte interferencia que media entre ellos; en este caso, la estructura más estable sería una forma anular constituida por varios monómeros. Más aún, las cadenas dotadas de grupos voluminosos tienden a despolimerizarse a temperaturas inferiores a las correspondientes a cadenas con poco impedimento estérico. La conjugación del efecto de rotación impedida y de impedimento estérico, que alarga la estructura del polímero, se denomina efecto del volumen excluido.

La química estructural de los compuestos inorgánicos se controla en equilibrio, porque así lo permiten las proporciones y naturaleza de los productos de reacción. Con independencia de la ruta cinética seguida, se obtienen los productos y las proporciones del equilibrio y su desarrollo puede controlarse termodinámicamente, es decir, variando la posición del equilibrio mediante condiciones de presión, temperatura y estequiometría (definición de las proporciones de los componentes en reacción). El control termodinámico excluye también el empleo de catalizadores, ya que éstos no alteran la posición del equilibrio.

Muchas reacciones transcurren en líquidos en una sola fase. Suelen seguirse en su preparación procedimientos de intercambio de sustituyentes. La reacción más empleada para la formación de polímeros inorgánicos es la de condensación. La polimerización por condensación consiste en la interacción de uno o varios componentes, con eliminación de un componente simple, como el agua, el ácido clorhídrico, el amoniaco, etcétera. Dichas reacciones originan un producto volátil que al escapar del sistema hace progresar la reacción (la llamada ley de Chatelier) o bien determinan que el equilibrio se produzca a raíz de un avance de la reacción suficiente como para que no sea preciso utilizar ese efecto.

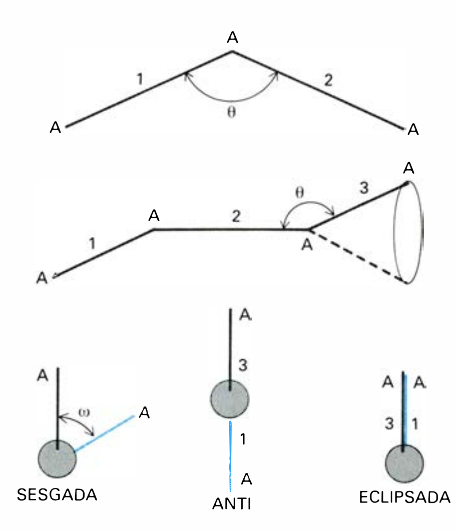
Otro proceso importante en la química preparativa de los polímeros inorgánicos es el de apertura de anillos. Implica la polimerización de un material de bajo peso molecular para formar cadenas a partir de la ruptura de oligómeros (polímeros constituidos por pocos monómeros) anulares. Ese segundo proceso se acopla a veces con el de la despolimerización de una estructura tridimensional, dándose intercambio de unidades entre las moléculas.

Con las reacciones de condensación no se agota la vía de formación de polímeros. Intervienen también, aunque a gran distancia, las reacciones de adición, que permiten la polimerización mediante combinación de las unidades fundamentales o monómeros, sin pérdida de ningún elemento integrante; las reacciones de adición quedan restringidas a la donación de electrones pi a orbitales de menor energía de un metal y a la formación de puentes de halógeno. Raramente implican la apertura de un enlace múltiple.

Un método sencillo para seguir, al menos cualitativamente, el curso de una polimerización consiste en observar el aumento de la viscosidad del sistema a medida que avanza el tiempo, calculando la resistencia que opone el fluido al giro de un agitador en su seno. También pueden detectarse las variaciones de densidad o de volumen específico registrado a través de un picnómetro. La temperatura puede servirnos también de indicador; en efecto, cuando es posible que se dé competencia entre polimerización y despolimerización, existe una temperatura límite, que es aquella a la que se produce un equilibrio dinámico entre los dos procesos (por igualarse las velocidades respectivas) y por encima de la cual no se forma el polímero.

El politio, -$(S)_n$-, se origina mediante la apertura por calentamiento del octámero cíclico de azufre rómbico. Se calienta hasta 498 grados Kelvin y se precipita el polímero sobre agua fría. Los polifosfanos, -$(PH)_n$-, se preparan por reacción entre bromuro de fósforo, (PBr_3), e hidruro de litio, (LiH), desprendiéndose hidrógeno durante la reacción. El hidrógeno borbotea y guía el desarrollo de la reacción.

Los polisiloxanos (siliconas) lineales HO-(R-Si-R-O)$_n$-H resultan de la condensación de silanodioles o de la copolimerización de silanodioles distintos.



ANGULOS DE ENLACE y efectos estéricos determinan el tamaño de las cadenas. Al enlazarse un átomo con otro no siempre emplea todos los electrones de la última capa; y así, en una molécula puede haber, junto a los electrones usados en enlaces, otros no enlazantes. Los electrones se repelen electrostáticamente; por ello, los enlaces se dispondrán en el espacio de forma que la repulsión sea mínima. Y a la hora de evaluar las repulsiones es preciso tener en cuenta también la repulsión de los pares no enlazantes. La situación se complica cuando del átomo nos adentramos en la construcción de la molécula. Supongamos una cadena de átomos de A, con un ángulo de enlace $\widehat{AAA}$, que llamaremos θ. Sea un trímero, o molécula formada por tres monómeros. Manteniendo fijo el plano determinado por los enlaces, trataremos de construir el tetrámero A_4, uniendo un tercer enlace. Si la rotación del enlace 2 fuera libre, el enlace 3 podría hallarse sobre cualquiera de las posiciones del cono de valencia dibujado, con lo que se conservaría el ángulo θ. Sin embargo, los efectos de repulsión entre el par electrónico del enlace 1 y del enlace 3 (interacciones de larga distancia o de largo enlace) hacen que su posición sea sobre el mismo plano de 1 y 2 y en dirección opuesta a 1. Se dice entonces que la rotación del enlace 2 está impedida, que existe una barrera energética de rotación (la diferencia de energías entre las conformaciones anti y eclipsada). Se suelen poner las energías de las conformaciones extremas y de las intermedias o sesgadas, en función del ángulo ω. De esta forma se obtienen representaciones del tipo cosinusoidal.

(Copolimerización es el proceso de formación a partir de monómeros diferentes.) Los polisiloxanos pueden obtenerse también por hidrólisis del diclorosilano o por apertura del anillo del octámero cíclico, el cual puede considerarse a su vez un coproducto de la reacción anterior. Se consiguen siliconas entrecruzadas por introducción de silanotriol o alquiltrihalosilano, pudiéndose complementar por incorporación en el polímero de otros metales trivalentes o tetravalentes en las cadenas (aluminio o titanio, por ejemplo). Por condensación de fenolsilanotriol se preparan polisesquisiloxanos, polímeros cuyo peso molecular es muy elevado, del orden de unos 200.000.

Por polimerización del ácido ortosilícico, SiO_4H_4, o sílice hidratada $SiO_2 \cdot H_2O$, se obtienen estructuras tridimensionales (cuarzo, tridimita y cristobalita), cuya fórmula es $-(O\text{-}Si\text{-}O)_n-$. Al fundir pirofosfato de sodio o potasio, y calentarlo luego a distintas temperaturas, se forman oligómeros cíclicos, que, por apertura del anillo, se transformarán en polímeros lineales; la sal de Madrell constituye un ejemplo de ello insoluble en agua y, la de Kurrol, otra muestra que se caracteriza por ser insoluble en soluciones de sales de metales.

Se forman oligómeros cíclicos del fósforo por reacción entre el cloruro de amonio, NH_4Cl, y el pentacloruro de fósforo, PCl_5. Se produce una mezcla de anillos de seis y ocho átomos; esa combinación de oligómeros, al calentarse a una temperatura de 573 grados Kelvin, rinde un ácido policlorurofosfonitrílico, un polímero lineal de fórmula $-(Cl_2P = N)_n-$, de acuerdo con un mecanismo que se cree viene desencadenado por el oxígeno. A partir de ese ácido, vulgarmente conocido por caucho inorgánico, se obtienen algunos polifosfacenos sustituidos.

Los polianhídridos de estructura semejante a la sílice y a los polianiones se forman por condensación, dando la fórmula M-O-M', a partir de M-OH; donde M puede ser el silicio y M' el aluminio o el titanio, o bien M fósforo y M' molibdeno, tal como ocurre en los fosfomolibdatos. En esta línea hay que entender el método elaborado por Andrianov y Turkevich: se condensan los reactivos para formar un oligómero que luego se somete a hidrólisis controlada para que rinda el polímero.

La interacción de tres unidades moleculares fundamentales (trímeros) o de tetrámeros de dialquilsiloxanos con un compuesto metilizado de fórmula $(CH_3)_3\ SiOAlCl_2$ a una temperatura de 423 grados Kelvin produce un sólido amorfo, de distinta estequiometría según la proporción en que intervengan los reactivos. Otras reacciones parten de monómeros de $(n\text{-}BuO)_3P$ y tetracloruro de silicio o de monómeros de $(n\text{-}BuO)_4$ y tricloruro de boro; estas reacciones permiten el intercambio mutuo, originando productos distintos según las sustituciones.

Desde antiguo se conocen los polifosfatos y los polimetafosfatos de fórmula $H\text{-}(PO_3Na)_n\text{-}OH$, donde *n* puede valer 1, 2, 3,..., 10^6. También existen los poliésteres, como el formado por reacción de cloruro de fosforilo y difenilolpropano. Debido a la triple funcionalidad del fósforo, podría darse un entrecruzamiento excesivo, controlable por bloqueo de los grupos finales mediante un alcohol o un fenol, que los saturaría. La funcionalidad se controla usando los dicloruros de alquilarilfosfonio o de alquilfósforo, dando resinas. En otros tipos de polímero, el fósforo se halla en un grupo lateral de la estequiometría o en los entrecruzamientos.

Los polímeros del boro constituyen un grupo especial que ha adquirido un extraordinario desarrollo recientemente. Los haluros de alquilboro reaccionan con los polialcoholes, resultando inclusiones de O-B-O en la cadena; los trihaluros de boro conducen a entrecruzamientos controlables por el empleo de mezclas adecuadas. A partir de cicloarilboratos y metanol se obtienen resinas de boro para revestimientos. La reacción de los trihaluros de boro con metacrilato sódico, en benceno, origina un anhídrido que puede polimerizar por vía radical empleando como iniciadores peróxido u azonitrilos. El boro puede incorporarse a un monómero orgánico convencional, ya sea por enlace con oxígeno o con carbono.

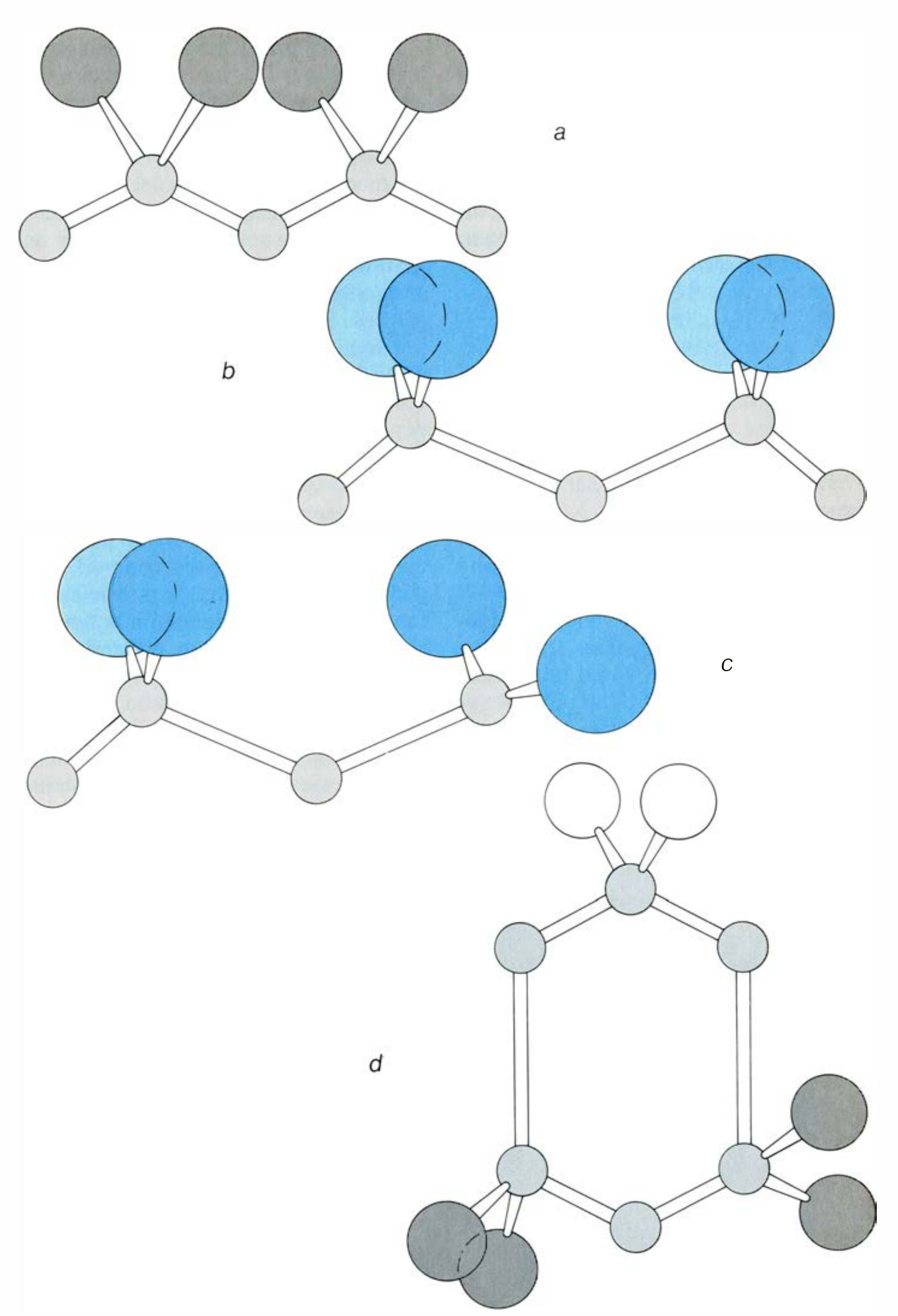
Hay dos tipos principales de polímeros C-B-C. El primero de ellos forma esos enlaces mediante una reacción de Friedel-Crafts que parte de un compuesto de fórmula $CH_3O\text{-}C_6H_4\text{-}BCl_2$. El segundo se forma por la reacción entre un compuesto de Grignard y tricloruro de boro como reactivos, seguida por un proceso de hidrólisis. En cuanto a los sistemas B-N-B, el compuesto de partida con que reacciona el boro es la m-difenilendimina o la p-difenilendimina. Sistemas boroamínicos que podrían polimerizar por condensa-

SE LLAMA ENLACE DE TRES CENTROS aquella interacción electrónica con solapamiento de tres orbitales atómicos. En la ilustración superior un grupo metilo se une a dos átomos de berilio, con solapamiento de tres orbitales atómicos, en vez de los dos que es el número corriente en los enlaces sigma. Enlaces similares se dan entre BHB en los hidruros de boro, cuya investigación ha avanzado mucho.

ción dan generalmente trímeros cíclicos B-N, borazinas, a partir de la reacción entre cloruro de amonio y BX_3. Las investigaciones en este campo, tendentes a evitar tales ciclaciones, han conducido paradójicamente a procedimientos de unión de varios anillos, anillos que cambian de composición según sea el derivado cíclico B-N de partida.

Otros polímeros de boro, producidos a pequeña escala, son el $(Cl_2B)_n$, producido por reacción entre el hidrógeno y el tricloruro de boro, y el $(X_2BCN)_n$ a partir de un trihaluro de boro y R_3SiCN. También se obtienen polímeros del tipo $(Cl_3B{\cdot}2CO)_n$ al hacer reaccionar una mezcla de tricloruro de boro y monóxido de carbono, empleando descargas eléctricas.

El auge del estudio de los hidruros de boro debido a su relación con la propulsión a chorro, condujo al desarrollo de la investigación sobre algunos polímeros afines. Tal fue el caso del decaborano, polímero que reacciona con bases dotadas de doble funcionalidad para dar, con desprendimiento de hidrógeno, ciertos compuestos del tipo $NC(CH_2)_4CNB_{10x}$ H_{12x} $NC(CH_2)_4CN$, donde x vale 10, aunque puede ser mayor. El término carborano designa una estructura icosaédrica cuyo núcleo tiene diez átomos de boro (como los decaboranos) unidos por dos átomos de carbono, y cuya fórmula estequiométrica es la siguiente: R-C($B_{10}H_{10}$) C-R'. El núcleo de la estructura se aproxima a una esfera de 40 nanómetros de radio. Según sean R y R', existirá una gran variedad de carboranos, que podrán agregarse a estructuras poliméricas. Se pueden formar también polímeros con hidruros de aluminio y de silicio por reacciones de condensación con etil y metil aminas. Y por adición se obtienen polímeros a partir de cianuro de cinc y acetilcetonato de cinc. Por el proceso de adición, tras apertura del anillo, se han polimerizado monómeros de ácidos bisdicetoberílicos. Sin olvidarnos, por fin, de las llamadas polimerizaciones por degradación, que son aquellas reacciones en las que un agente de coordinación convierte una estructura bidimensional o de tres dimensiones en un sistema más lineal.



IMPEDIMENTO ESTERICO, o repulsión entre grupos voluminosos. Dicho impedimento interviene en la longitud de las cadenas. La estabilidad de éstas se ve favorecida por grupos laterales pequeños (*a*), que no interfieren entre sí. Con grupos voluminosos (*b* y *c*), en cambio, dicha cadena sería inestable pues habría una fuerte interferencia, siendo la estructura más estable la de una forma oligomérica anular (*d*).

Las moléculas de muchos polímeros inorgánicos intercambian partes entre sí con cierta facilidad y son muy reactivos a la atmósfera. Ello determina que se requieran métodos de análisis rápidos y una especial atención para evitar contaminaciones y pérdidas de la muestra. Labilidad y sensibilidad que recuerdan esas mismas propiedades en los sistemas biológicos.

Un método muy fructífero para el estudio de familias de compuestos, desde las formas neso más simples hasta las macromoléculas, es el de la resonancia magnética nuclear. Esta técnica se funda en el principio general siguiente: la señal de radiofrecuencia es absorbida parcialmente cuando su frecuencia y el campo magnético se combinan y dan la energía necesaria para cambiar la orientación de los núcleos con respecto al campo; permite determinar las relaciones espaciales entre núcleos e indica la naturaleza de los núcleos vecinos más próximos. En nuestro caso se ha estudiado principalmente para el isótopo flúor-19; en particular se han considerado los espectros RMN de diversas mezclas en equilibrio de AsF_3 y As_2O_3 o varias relaciones F/As, y dan la interpretación de estos espectros en términos del número de moléculas con puentes As-O-As.

Otros métodos espectroscópicos, como los Raman, que se sirven del láser como fuente de radiación y los espectros obtenidos son complementarios a los infrarrojos normales y ayudan a determinar las dimensiones de las moléculas, son muy útiles, si bien la inter-

pretación de los datos no resulta tan inmediata. Los diversos métodos de cromatografía en disolución (en papel, capa fina, columna, de exclusión molecular, etcétera) ofrecen un amplio horizonte de promesas en este campo.

P. Gili y colaboradores, de la Universidad del País Vasco, han estudiado la descomposición térmica de polimolibdatos, de base orgánica, del tipo $(AH_2)_2Mo_4O_{13}$, donde A significa piridina, metilpiridina o isoquinolina, mediante rayos X e infrarrojos; vieron que se trataba de un proceso en dos etapas, gobernadas por un mecanismo de nucleación aleatoria. B. M. Gatehouse y P. Leverett han llevado a cabo estudios espectrográficos de rayos X para establecer la estructura de compuestos análogos. Y recientemente, Issa A. Katime y colaboradores, de la Universidad del País Vasco, han demostrado que algunos compuestos inorgánicos de base orgánica se comportan como polímeros. Entre las técnicas utilizadas para ello se contaban la osmometría de presión de vapor, crioscopía, difusión de luz y viscosimetría.

Al principio del artículo hacíamos un breve repaso de las propiedades de los polímeros inorgánicos. Vamos a terminar el trabajo con un examen más pormenorizado de las mismas. Muchos químicos opinan que la solución al problema de la búsqueda de propiedades óptimas de los polímeros se halla en un término medio entre materiales completamente inorgánicos y polímeros orgánicos. Se investigan polímeros lineales, sin sustituyentes iónicos, para favorecer la flexibilidad, y con elementos inorgánicos en el esqueleto, para obtener estabilidad frente al calor y la oxidación, así como flexibilidad y estabilidad en un amplio rango. Los polímeros lineales son cristales a temperaturas bajas. Al calentarlos, llega un punto en que se vuelven gomosos como el caucho: es la temperatura de transición vítrea; a medida que aumenta la temperatura, el polímero se va reblandeciendo hasta terminar por licuarse. Si el material es cristalino, existirá un punto de fusión muy definido.

El polímero ideal sería aquella macromolécula que recordara los cristales inorgánicos, pero de tal suerte alterada que se mostrara flexible a temperaturas ordinarias. La restricción ligada a ello es que los enlaces deben ser covalentes para evitar el ataque por agua u otros disolventes iónicos, o que existieran entrecruzamientos iónicos que redujeran esa flexibilidad. Esta última depende también de los impedimentos estéricos causados por los átomos presentes en el esqueleto de la cadena o en sus ramificaciones. Los sustituyentes voluminosos tienden a aumentar la rigidez.

La idea del aumento de la flexibilidad constituye la base del diseño de siliconas. Su temperatura de transición se halla en los 143 grados Kelvin, con un rango de elasticidad que va de 213 a 525 grados K. Se atribuye su elevada movilidad a la falta de cargas en los grupos laterales y al hecho de que éstos se unan a distintos átomos, en vez de a todos los átomos del esqueleto, como sucede en polímeros orgánicos. Si bien su punto de fusión es más alto, las siliconas entrecruzadas en escalera poseen menos flexibilidad y resistencia a los disolventes.

El polidiclorofosfageno, o caucho inorgánico, está constituido enteramente por elementos distintos del carbono. Sus propiedades aventajan a las del caucho orgánico. En efecto, permanece elástico al enfriarse y sólo se endurece cuando la temperatura desciende hasta los 210 grados K (temperatura de transición). En condiciones atmosféricas, se descompone en ácido fosfórico, amonio y clorhídrico. El elastómero queda convertido en un polvo. Se cree que esa ruptura hidrolítica se inicia con la reacción de los enlaces Cl-P con el agua. Pero esa dificultad se evitaría si se sustituyeran los átomos de cloro por grupos no hidrolizables. Propiedad que ya presentan compuestos derivados del $(Cl_2PN)_n$, donde N aquí no significa nitrógeno sino P(OR) (OR'), amén de tener otras, como la elasticidad, flexibilidad, termoplasticidad y gran resistencia a los disolventes. Pese a su gran versatilidad, siliconas y poliorganofosfagenos tienen un defecto: su gran tendencia, por encima de 473 grados Kelvin, a despolimerizarse, dando oligómeros cíclicos. Ello limita grandemente las temperaturas a las que pueden emplearse.

Por lo general, los polianhídridos son compuestos infusibles. Los procedentes de las primeras fases de policondensación se disuelven en disolventes orgánicos, aunque el mayor grado de condensación y calentamiento los vuelve insolubles. La estabilidad frente a la hidrólisis depende de los elementos: el

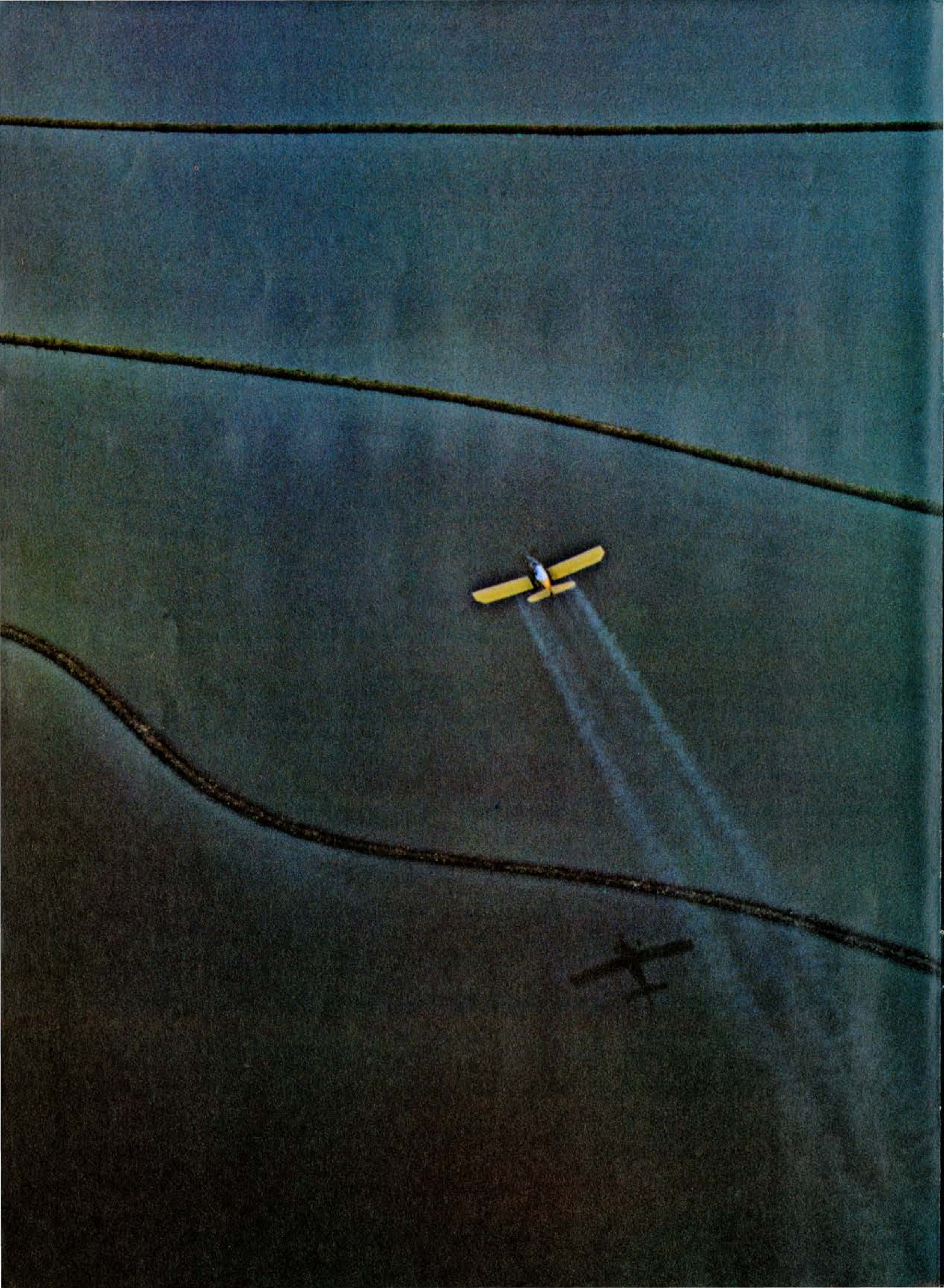
POLIMEROS AMORFOS Y CRISTALINOS muestran diferentes propiedades según la temperatura. Todos los polímeros lineales son cristales a temperaturas bajas. Al calentarlos, llega un punto en que se vuelven gomosos como el caucho: es la temperatura de transición vítrea. A temperaturas mayores todavía, el polímero se reblandece, haciéndose más gomoso, para terminar licuándose. Si el material es cristalino existirá un punto de fusión muy definido. Los polímeros amorfos no presentan una diferencia entre fases tan clara como los cristalinos flexibles y termostáticos en un rango amplio de temperaturas.

boro y el fósforo, por ejemplo, dan productos muy reactivos. Algunos polianhídridos en cuya estructura entra el silicio y el aluminio, el titanio o el estaño son útiles como resinas, flexibles y dotados de una gran dureza superficial y estabilidad térmica.

Los polímeros de boro ofrecen un amplio espectro de propiedades. Los sistemas B-O-B suelen ser estables térmicamente, cristalinos, infusibles e insolubles en disolventes orgánicos, pero bastante reactivos frente a la hidrólisis. Ciertos materiales se emplean como combustibles en fuseología y también como lubricantes. Las estructuras boro-éster son estables a altas temperaturas. A veces, el boro se incorpora a una polimerización orgánica para dar resinas termoestables de gran dureza, capacidad aislante y poca inflamabilidad. Los sistemas carbono-boro-carbono suelen ser cristalinos, estables hasta una temperatura de 350 grados Kelvin y portadores de otras propiedades interesantes. En cuanto a los sistemas boro-nitrógeno-boro, los trihaluros son insolubles e infusibles, pero fácilmente hidrolizables. Por último, los fosfinoboruros con bajo punto de fusión se aplican como fluidos hidráulicos.

Los carboranos tienen un interés reconocido en la industria aeronáutica. Plastificados con nitrilos dan gomas y aceites o resinas termoplásticas. Tienen homólogos estables al aire. Los polímeros formados a partir de aluminio-nitrógeno muestran una amplia gama de puntos de fusión, según los tipos; son sensibles a la intemperie y al oxígeno. Los enlaces silicio-nitrógeno, térmicamente fuertes, resultan fácilmente hidrolizables. Los polímeros de coordinación son solubles en diversos disolventes orgánicos y, aunque no se han investigado en general, podrían convertirse en buenos elastómeros.

Disponemos de mediciones de las propiedades de fricción y esfuerzos de cizalla para el politrisfosfinato de cromo a altas presiones; la variación del coeficiente de fricción no es constante con respecto a la carga. Los estudios en torno a los esfuerzos de tensión relacionan la flexibilidad o fragilidad de dicho material con los sustituyentes incluidos en las cadenas, en la misma línea conceptual de impedimento estérico y rigidez en la conformación estructural, de los que nos ocupábamos más arriba. La degradación térmica de estos compuestos se inicia sobre los 200 grados centígrados, estando en los 440 grados C el promedio para los polidifenilfosfinatos de cinc.



El cultivo del arroz en California

Con métodos aéreos de siembra y aplicación de herbicidas, y el dominio de técnicas ultramodernas, los arroceros californianos obtienen altos rendimientos en su producción, que desempeña un papel destacado en el mercado mundial

J. Neil Rutger y D. Marlin Brandon

La producción de arroz en California se ha transformado en uno de los cultivos agrícolas mejor mecanizados del mundo. Entre otras innovaciones, cabe destacar la nivelación de los campos por rayos láser, la siembra desde el aire (por aviones) y la recolección mediante cosechadoras especiales que no se quedan atascadas en el barro de los arrozales. El rendimiento obtenido en California en 1979, 7230 kilogramos por hectárea, fue un 50 por ciento superior al rendimiento medio de los otros estados productores de la Unión y cerca de tres veces mayor que la media mundial, cifrada en 2645 kilogramos por hectárea. Aunque la superficie arrozal de los Estados Unidos representa sólo el 0,9 por ciento de la total mundial, éstos producen el 1,7 por ciento de la cosecha mundial; y en numerosas temporadas ocupan el primer lugar entre los países exportadores.

Cerca del 60 por ciento de la producción anual norteamericana, superior a los seis millones de toneladas métricas, se destina a la exportación, de cuyo cupo más de la mitad se dirige a Asia. Aproximadamente la cuarta parte de la producción estadounidense se cultiva en California. Arkansas, con una superficie arrozal de algo más de dos veces la californiana, produce apenas un 60 por ciento más que California; es el mayor productor de arroz del país. Se cultiva también de una manera destacada en Texas, Louisiana y Mississippi. La mano de obra empleada en las faenas de siembra, cuidado y cosecha de una hectárea de arroz en los cinco principales estados productores de la Unión se estima en 17 horas-hombre por cosecha, lo que contrasta abiertamente con los requerimientos homólogos en la mayor parte de Asia y Africa, cifrados en más de 700 horas por hectárea y cosecha, con el agravante de que los rendimientos por superficie son muy inferiores.

Aunque considerado un cultivo tropical, el arroz se siembra hoy en todos los continentes, salvo en la Antártida, a lo largo de una franja que va desde los 53 grados de latitud norte hasta los 40 grados de latitud sur. Más del 90 por ciento de la producción mundial de arroz, calculada en 368 millones de toneladas métricas, se obtiene en Asia. A escala mundial, el arroz ocupó, en 1979, una superficie de cultivo de 139 millones de hectáreas, siendo sólo superado por el trigo, entre los cereales, en superficie y producción. (La producción mundial de trigo en 1979 fue de 448 millones de toneladas métricas, obtenida de 227 millones de hectáreas.) En Asia, donde el consumo anual per cápita se halla en torno a los 95 kilogramos, el arroz aporta de un tercio a un medio de los requerimientos calóricos diarios y constituye el principal aporte de proteínas. Los norteamericanos consumen unos cinco kilogramos al año.

Casi todo el arroz cultivado pertenece a la especie asiática *Oryza sativa;* en Africa se cosecha cierta cantidad de una especie afín: *Oryza glaberrima.* En total se conocen 20 especies de *Oryza.* La arqueología ha puesto de manifiesto que el arroz se cultivaba hace 6000 o 7000 años en el sudeste asiático y en China meridional. Más tarde se extendió por la India, Indonesia, Filipinas, resto de China, Corea y Japón. A lo largo de ese proceso, *Oryza sativa* se diferenció en tres razas ecogeográficas: índica, japónica y javánica. La raza tropical, índica, parece haber dado origen a las otras dos. Al propagarse la raza índica hacia el norte de China y Japón apareció la raza japónica, resistente al frío. Cuando llegó a Indonesia, dio lugar a la raza javánica, de tallos altos y gruesos. Las variedades de arroz de California son básicamente japónicas, mientras que las cultivadas en la parte meridional de los Estados Unidos son intermedias entre la japónica y la índica. La raza javánica no se cultiva en los Estados Unidos.

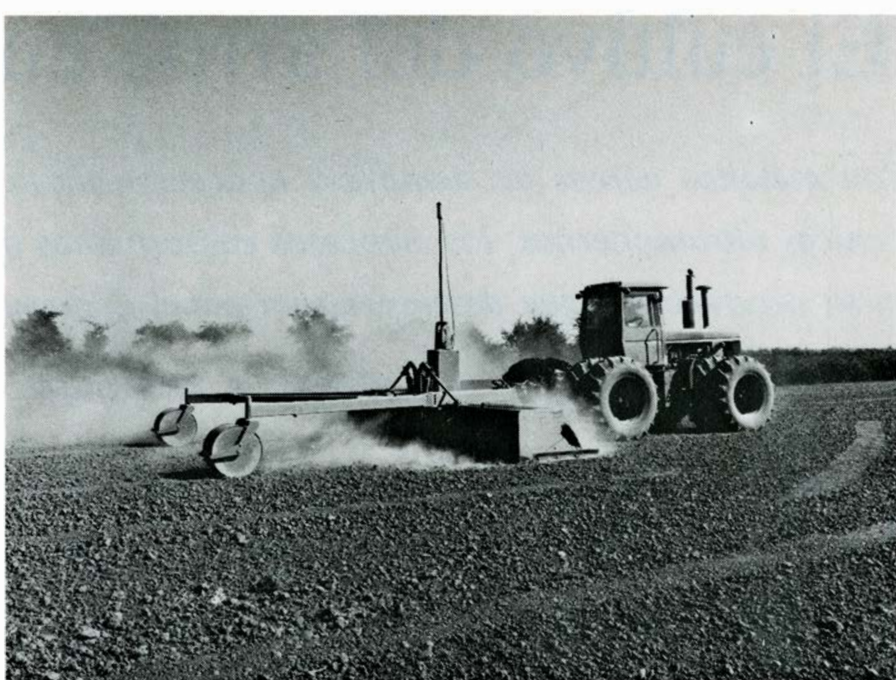
El arroz había penetrado ya en América del Norte en 1609, asentándose su cultivo en Carolina del Sur hacia el 1690. Hasta 1890, más o menos, se plantaba, principalmente, en los estados del sudeste. Llega a Louisiana en 1888, y muy pronto se extenderá por Texas, Arkansas y California. En 1909 se practican cultivos experimentales en el valle de Sacramento y, hacia 1912, se alcanzan ya, en esta zona, producciones de interés comercial. La cosecha de arroz, por tanto, viene a ser una especialidad agrícola reciente en las zonas que hoy muestran la mayor producción de los Estados Unidos.

En California, su cultivo queda circunscrito, en gran parte, a las lagunas de los valles de Sacramento y San Joaquín. Suelos arcillosos macizos y con capas impermeables frenan la percolación del agua y facilitan la inundación permanente de los arrozales, con mínimas pérdidas de agua y máximo rendimiento de la cosecha. Hay agua en abundancia y de calidad. El 90 por ciento de los arrozales californianos se abastecen de los ríos Sacramento y Feather. La precipitación anual en forma de lluvia y nieve se embalsa en las presas Shasta, en el curso del Sacramento, y Oroville, en el del Feather. A lo largo del año, el caudal represado se destina al riego y usos varios.

La continua inundación del suelo, necesaria para el cultivo, precisa de unos 2440 milímetros de agua por hec-

HERBICIDA GRANULAR lanzado desde una avioneta que vuela sobre los arrozales del Valle Sacramento, en California. El arroz se cultiva en campos nivelados con precisión, que se inundan de agua hasta una profundidad de entre 5 y 10 centímetros. Los campos se dividen por márgenes sinuosos que siguen las curvas de nivel naturales del terreno. Las malas hierbas se controlan mediante una regulación exacta de la profundidad del nivel de agua en combinación con el uso limitado de varios herbicidas autorizados.





NIVELACION EXACTA de los campos de arroz; se realiza con la ayuda de un rayo láser giratorio instalado sobre un mástil (*izquierda*), que constituye el nivel de referencia para las traíllas que trabajan dentro de un gran radio de acción. El rayo láser de referencia es detectado por una célula fotoeléctrica instalada sobre una traílla especial, llamada nivel triplano (*derecha*). Al tiempo que la traílla recorre el campo, el rayo láser interceptado se procesa por un pequeño ordenador que controla, mediante un mecanismo hidráulico, la acción de levantar y bajar la "hoja niveladora" del nivel triplano. Dando una leve inclinación al plano que forma, en su giro, el láser de referencia, se le puede conferir al campo la pendiente requerida de una o dos partes por 1000.

LOS MARGENES SE CONSTRUYEN mediante arados especiales dotados de dos series de discos que amontonan el terreno formando un murete de unos 60 o 90 centímetros de altura. En esta vista aérea se distinguen dos arados en plena labor. La distancia entre los márgenes exige que la profundidad ideal del agua no sea menor de cinco centímetros junto al margen de la parte más alta del campo y no mayor de diez centímetros junto al de la parte inferior. La corta separación entre los márgenes de la fotografía indica que la superficie del terreno tiene bastante pendiente en esta sección del campo. En zonas más horizontales la separación entre márgenes puede ser de hasta 100 metros. Una vez construidos los márgenes se procede a la distribución de fertilizantes.

tárea y año. Unos 915 suplen las necesidades de las plantas y se liberan por evapotranspiración. Del resto, la mitad se pierde por percolación para recargar la capa freática y la otra mitad rebosa del campo y descarga en las redes de desagüe, aguas abajo. Así pues, casi dos tercios del agua empleada en el campo se recicla en el sistema suelo-agua o se reutiliza para otros fines agrícolas o municipales.

El clima templado del Valle Sacramento se acerca a las condiciones que se suponen ideales para la producción arrocera. Luminosidad abundante, escasa humedad y días y noches cálidos influyen decisivamente en la alta productividad de la zona. El ataque de insectos y las enfermedades se reducen al mínimo por la sequedad de los meses de verano, cuando la humedad relativa apenas si sobrepasa en alguna ocasión del 40 por ciento. (Aunque la parte inferior de la mata queda sumergida, la aireada se beneficia de una humedad escasa.) Las bajas temperaturas, que frecuentemente se registran desde agosto, exigen que las variedades que se cultivan en California sean resistentes al frío.

Durante los últimos años, se ha recurrido a la mejora de las variedades para aumentar el rendimiento. Se fijaron las metas siguientes: obtención de variedades resistentes, de alto rendimiento y de buena calidad de grano. En el marco de esos objetivos generales, los biólogos expertos en genética del arroz se propusieron acortar el ciclo de cultivo, aumentar la tolerancia al frío, mejorar la forma y la calidad a la cocción del grano y aumentar la resistencia a las enfermedades e insectos. El arroz plantea un problema particular: la tendencia de la mata a encamarse, a tumbarse antes de alcanzar la plena madurez. En la pasada década, la mejora más significativa registrada en las variedades californianas tuvo que ver con el desarrollo de variedades de talla baja, muy resistentes al encamado.

Los trabajos realizados a mediados de la década de 1960 en el Instituto Internacional de Investigación del Arroz, de Filipinas, demostraron que la reducción genética de la altura de la planta implicaba también un incremento en el rendimiento productivo. Las plantas de menor talla no sólo eran más resistentes al encamado, sino que respondían mejor a la aplicación de fertilizantes: venían a doblar el rendimiento de las antiguas variedades, más altas. Esa resistencia reforzada al encamado ofrecía dos ventajas. La primera consistía en que las plantas permanecían erectas hasta su madurez y podían proseguir así el proceso de fotosíntesis con intensidad durante el período crítico de llenado de los granos. El sombreado mutuo de las plantas encamadas reducía la fotosíntesis. La segunda ventaja afectaba a la facilidad y eficacia de la recolección. Las plantas encamadas solían terminar dobladas sobre el barro, lo que frenaba la recolección y reducía la cantidad de grano recogido por la cosechadora.

La introducción de las nuevas variedades de talla baja incidió más en los trópicos que en los Estados Unidos, donde los rendimientos de las variedades norteamericanas ya eran elevados.

LUGAR	SUPERFICIE COSECHADA (1000 HECTAREAS)	RENDIMIENTOS (KILOGRAMOS POR HECTAREA)	PRODUCCION (1000 TONELADAS METRICAS)
ARKANSAS	481	4.988	2.400
CALIFORNIA	216	7.229	1.561
LOUISIANA	216	4.427	957
TEXAS	210	4.707	989
MISSISSIPPI	83	4.707	390
MISSOURI	14	4.651	68
ESTADOS UNIDOS	1.220	5.211	6.368
MUNDIAL	139.246	2.645	368.244

PRODUCCION DE ARROZ de los Estados Unidos en 1979. Fue de 6,36 millones de toneladas métricas, lo que representa algo más del 1,7 por ciento de la producción mundial, aunque la superficie cultivada representaba sólo el 0,9 por ciento de la superficie mundial dedicada al arroz. El rendimiento por hectárea nacional vino a doblar casi la media mundial. El rendimiento en California fue un 50 por ciento mayor que el rendimiento medio de los demás estados productores de arroz. El valor de la cosecha arrocera norteamericana de 1979 superó los 1300 millones de dólares. Aproximadamente el 60 por ciento de la cosecha se exportó, con más de la mitad de la cantidad total destinada al continente asiático. Son muchos los años en que los Estados Unidos encabeza la lista mundial de exportadores de arroz.



EL FERTILIZANTE NITROGENADO se aplica a los campos de arroz de California, a razón de 134,5 kilogramos de nitrógeno por hectárea, poco antes de realizar la siembra. Puede distribuirse en forma seca, como la urea y el sulfato amónico, o líquida, como el hidróxido amónico, que es la forma de aplicar el abono en California. En todo caso, el abono se incorpora al terreno entre cinco y diez centímetros por debajo de la superficie para reducir al mínimo la oxidación y quedar así disponible para las raíces.

Ello no obstante, las variedades de porte bajo han aumentado la producción californiana en un 15 por ciento, aproximadamente. En 1979, cuando se sembró con variedades de talla corta la mitad de la superficie dedicada al cultivo arrocero en los Estados Unidos, el rendimiento medio, calculado en 7230 kilogramos por hectárea, fue unos 670 kilogramos por hectárea mayor que el año anterior.

En California, las variedades de arroz de talla baja se han obtenido por mutación inducida, por hibridación y por combinación de ambos métodos de mejora. Los principales centros dedicados a la investigación genética son la Rice Experiment Station, dirigida por la California Cooperative Rice Research Foundation, con sede en Biggs, y la University of California Rice Research Facility, con sede en Davis; una y otra institución están subvencionadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y por la industria californiana del arroz. Ambos centros experimentales han obtenido un éxito importante en la inducción de mutaciones favorables por medio de la exposición de granos de arroz a la radiación gamma del cobalto 60, que es un isótopo radiactivo. Las mutaciones no se hacen patentes hasta la segunda generación y, como todas las mutaciones inducidas, producen más mutantes perjudiciales que favorables. La primera variedad aceptable de porte bajo conseguida en California, Calrose 76, fue un mutante derivado de Calrose, variedad apreciada de porte alto. Se cruzó Calrose 76 con otras variedades de porte alto para obtener cuatro nuevas variedades de porte bajo. Actualmente, la variedad de este tipo más apreciada, la M9, es un híbrido logrado por los genetistas de Biggs, cuyo gen que codifica para la talla baja procede de la IR8, variedad natural de los trópicos.



SEMILLAS DE ARROZ tratadas con un fungicida para controlar las enfermedades en la fase de plántula. Se ponen luego a remojo en agua durante 24 horas y se siembran después de escurrirlas por un período de 12 a 24 horas. El arroz que se aprecia aquí es una nueva variedad de maduración precoz, llamada M9.



AVIONETAS DISTRIBUIDORAS DE SEMILLA. Pueden cargar hasta 550 kilogramos de semilla remojada. El remojo asegura que la semilla esparcida desde el aire se hunda rápidamente en el terreno.

El gen responsable de la talla baja es idéntico en la planta mutante, Calrose 76, que en la natural IR8. El uso de Calrose 76 como genitor en California se ha revelado más eficaz que IR8, lo que obedece, principalmente, a que la mutación inducida suministrara el carácter buscado a un genotipo adaptado a las condiciones de California. IR8 y otros genitores tropicales son susceptibles al frío y poco adaptados a las condiciones particulares de California; ello dificulta la transferencia del gen de porte bajo a una planta híbrida bien adaptada.

En California se prefieren variedades de maduración temprana, porque le permiten al agricultor comenzar antes la recolección y, por tanto, reducen los riesgos que acarrea la meteorología otoñal. Las variedades cultivadas habitualmente necesitaban de 150 a 165 días desde la siembra, a principios de mayo, hasta la recolección en septiembre-octubre. Las primeras variedades tempranas introducidas en California, que pueden recolectarse aproximadamente 135 días después de la siembra, rinden menos por unidad de superficie que las variedades tardías. Desde hace algunos años, sin embargo, distintas variedades tempranas seleccionadas, las M9 y M101, por ejemplo, pueden incluirse entre las variedades de mayor rendimiento a disposición de los campesinos californianos.

Las temperaturas frías afectan al cultivo del arroz en ese rincón del mundo en dos estadios: a lo largo de la emergencia de las plantas y entre 10 y 14 días antes de la floración, cuando se están formando las células reproductoras por el proceso de meiosis. Durante la siembra, la temperatura del agua suele hallarse en torno a 18 grados Celsius, o



AVIONETAS SEMBRADORAS, que requieren un manejo muy preciso. Vuelan sobre los campos de arroz inundados, distribuyendo la semilla a razón de 170 kilogramos por hectárea. La semilla pasa a través de un distribuidor neumático montado, a bordo de la avioneta, que la esparce uniformemente sobre una banda de unos 10 metros de anchura. Aquí se ven en el momento de golpear la superficie del agua. Pueden sembrarse así de 120 a 200 Has/día.

menos. El desarrollo inicial es lento. La formación de plantas vigorosas se favorece por una rápida emergencia y crecimiento de la mata a través del agua fría. Cuando los genetistas de California se propusieron obtener plantas de talla baja, temían que estas variedades carecieran del vigor necesario para la formación de un buen sembrado. Sin embargo, merced a la selección intensiva, las variedades de talla baja como Calrose 76, M7 y M101 han demostrado ser tan vigorosas como las variedades más antiguas y de mayor porte.

Durante la segunda fase de susceptibilidad al frío, en el proceso de la meiosis, un descenso de temperaturas por la noche hasta 13 grados Celsius puede agudizar el aumento de esterilidad, que se traduce en un mayor número de granos vacíos. La esterilidad inducida por el frío puede llegar hasta el 40 por ciento en algunos años y en determinadas zonas. Ello justificaba el esfuerzo puesto en la selección de variedades con una mayor tolerancia al frío. Afortunadamente, la antigua variedad Calrose, extensamente cultivada en California, es bastante resistente al frío; característica que posee realzada la variedad de talla baja Calrose 76. En el trópico, la esterilidad del arroz alcanza del 10 al 12 por ciento, lo que se supone constituye el límite mínimo viable. En California se ha fijado como meta mantener la esterilidad máxima entre el 10 y 15 por ciento. Objetivo que se ha cubierto ya en las variedades más recientes merced a una selección intensiva para baja esterilidad, llevada a cabo por los genetistas de la Davis Rice Research Facility en las frías condiciones ambientales de los campos experimentales del citado organismo.

Hasta hace poco, las variedades de



VARIEDADES DE ARROZ DE TALLA BAJA Y ALTA en un cultivo experimental del Valle Sacramento. Los agricultores de California utilizan cada vez más las variedades de porte bajo, como la M301, que se aprecia en la parte derecha de la fotografía, porque producen al menos un 15 por ciento más de arroz que las de porte alto. Las variedades de talla alta tienden a encamarse, tras alcanzar su pleno desarrollo.

arroz de California eran de grano corto (menos de 7,5 milímetros de longitud) o de grano mediano (de 7,5 a 8,5 milímetros). Se preferían las variedades de grano largo en las zonas arroceras del sur de los Estados Unidos y en la mayor parte de los trópicos; su susceptibilidad al frío hacía inviable su cultivo en California. El grano de las variedades de grano largo mide aproximadamente 9,5 milímetros de longitud. A lo largo de un proceso secular, han ido apareciendo en los trópicos variedades de grano largo, pero cuando el cultivo del arroz llegó a las regiones septentrionales de China y Japón la selección natural para aumentar la resistencia al frío anduvo en clara concomitancia con el desarrollo de granos cortos. La mayoría de las variedades de grano largo son susceptibles al frío, y, tolerantes, muchas de las de grano corto y grano medio.

Los estudios actuales demuestran que no hay tal rigidez en la asociación genética entre la longitud del grano y la resistencia al frío, pero se han requerido muchos años de investigación para deshacer el resultado de varios siglos de evolución. Los agricultores californianos disponen ya de una variedad de grano largo resistente al frío, y otras más estarán a su alcance en el futuro.

Los arroces de grano corto y grano medio suelen ser húmedos, gomosos o pegajosos después de la cocción; los de grano largo son secos y escamosos. La razón principal de estas diferencias estriba en el contenido en amilosa del almidón. Las variedades de grano corto y grano medio poseen un contenido en amilosa del 15 al 20 por ciento; las de grano largo, en Estados Unidos, lo tienen en torno al 24 por ciento. En términos generales, existe correlación entre el contenido en amilosa y la longitud del grano: las variedades de grano corto y grano medio muestran una concentración baja de amilosa y, las de grano largo, alta. Pero la investigación reciente acaba de revelar que no hay ninguna base genética que dé pie a esta correlación. Pueden obtenerse, pues, variedades de grano largo con bajo contenido de amilosa, que se comporten en la cocción como las de grano corto o grano medio, y obtenerse variedades de grano corto o grano medio con alto contenido de amilosa, que lo hagan como si fueran de grano largo. Los mercados estadounidenses, sin embargo, están habituados a la asociación tradicional entre longitud de grano y textura después de la cocción, lo que explica el sentido de la selección de la mayoría de las variedades. En California, el desarrollo de variedades de grano largo con contenido alto de amilosa ha permanecido estanco por la casi general susceptibilidad al frío de los genitores de grano largo. Se están dando grandes pasos hacia la resolución del problema a través de una labor incesante de selección, tendente a conseguir variedades de grano largo tolerantes a las bajas temperaturas y alto contenido de amilosa.

La producción de arroz exige una inversión continua a lo largo de todo el año. La preparación de la tierra, la fertilización, el control de plagas, la regulación del agua y la recolección deben realizarse en el momento justo para que la producción de arroz sea rentable. El agricultor que cuenta con tecnología moderna suele sacar un mayor rendimiento.

Un cultivo eficaz comienza con la nivelación de los campos, trazada con gran precisión, terraplenando cuidadosamente los desniveles del terreno. Importa nivelar los campos con una ligera pendiente, entre el 1 y el 2 por mil, para controlar de un modo exacto la profundidad del agua mientras el arroz está sembrado y para facilitar el rápido desagüe de los campos en el momento de la recolección.

Recientemente, se han aplicado modernos procedimientos físicos y electrónicos para la nivelación del terreno. El procedimiento más refinado consiste en un rayo láser giratorio que se coloca sobre un mástil y se instala en el campo a nivelar. El rayo láser giratorio proporciona una referencia exacta de la altitud y se detecta con un receptor instalado sobre un tractor que arrastra una especie de traílla (hoja niveladora). Una conexión hidráulica automática obliga a la traílla a mantener un nivel preseleccionado, incluyendo la pequeña pendiente que se requiere para el

desagüe. Con un solo láser pueden controlarse simultáneamente varios tractores. Tal precisión en la nivelación es necesaria únicamente para la preparación inicial del campo de arroz.

Tras esa nivelación, se labra el suelo con grandes tractores provistos de un arado de vertedera o discos que mullen el terreno y desmenuzan los terrones. Finalmente, se realiza la nivelación última con un nivelador triplano, así llamado porque la amplia hoja niveladora está dotada de tres puntos de sostén: una gran rueda en cada extremo de la hoja y un eje en la parte posterior del tractor. El nivelador desmonta o terraplena las zonas, con cota positiva o negativa, formadas después de la nivelación inicial de precisión.

El último paso de preparación del terreno consiste en el levantamiento de los márgenes, de medio metro a un metro de altura, para controlar el nivel del agua. La distancia entre márgenes es función de la pendiente del terreno. Siguen las curvas de nivel del terreno para lograr una pendiente adecuada, la ya citada del 1-2 por mil. Para identificar y señalar las curvas de nivel donde se levantarán los márgenes, suele recurrirse hoy a un rayo láser. La mayoría de los márgenes se levantan con un tractor, de diseño especial, equipado con dos series de grandes discos, cuya inclinación permite que se amontone terreno continuamente detrás de ellos. Una vez



RECOLECCION DEL ARROZ, entre 20 y 30 días después del drenaje de los campos. La elección de la fecha de comienzo del desagüe depende críticamente de la madurez del grano, de las características de la variedad concreta cultivada y del conocimiento de las características de drenaje del suelo en cultivo. La recolección se realiza a través de grandes cosechadoras provistas de cadenas en lugar de neumáticos de caucho, de modo que puedan trabajar en el terreno fangoso de los arrozales. Los granos pasan de las cosechadoras a los vehículos cisterna de arroz cáscara, que vierten la cosecha a los camiones que esperan en el camino. En el estado de California, la mayoría de los campos suelen recolectarse entre el 20 de septiembre y el 20 de octubre.

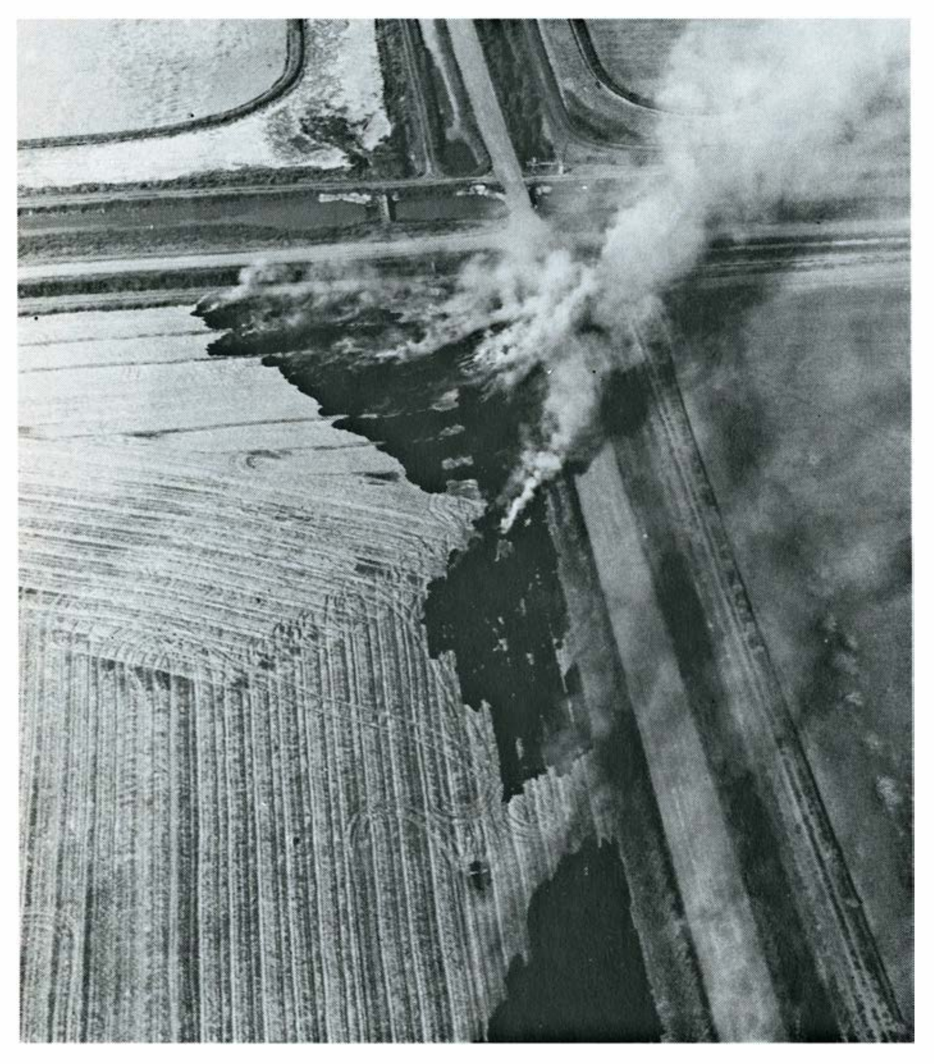
construidos los márgenes, se puede proceder a la distribución de fertilizantes y pesticidas.

La mayoría de los agricultores californianos utilizan aviones para una aplicación rápida y oportuna de pesticidas y de algunas formas de fertilizantes. Aunque suele ser el nitrógeno el factor nutritivo limitante del desarrollo vegetal, para alcanzar un máximo rendimiento deben también aplicarse, en ciertas zonas, fertilizantes de fosfatos y de zinc. Los campesinos se basan en análisis químicos del suelo y de los tejidos de la planta para determinar los niveles adecuados de fertilización. De esta manera, se logran rendimientos óptimos por hectárea con el menor gasto de fertilizantes, y sin contaminar con un exceso de fertilizantes el agua de lluvia que se infiltra a través del terreno.

Los agricultores saben que el momento más idóneo para el suministro de la mayor parte del nitrógeno requerido es antes de la siembra. Normalmente, los fertilizantes nitrogenados en forma seca, como urea y sulfato amónico, se aplican en cantidad necesaria para proporcionar unos 135 kilogramos de nitrógeno por hectárea. Se aporta también nitrógeno a través de amoníaco líquido. El fertilizante se incorpora al terreno a una profundidad de 5 a 10 centímetros en cualquiera de las dos formas, seca o líquida. A esta profundidad, a la que el nitrógeno amoniacal se encuentra por debajo de la zona de oxidación de la interfase terreno-agua, permanece en forma reducida y por tanto se encuentra siempre disponible para las raíces de las plantas sembradas. Si las plantas muestran síntomas de privación durante el cultivo, se puede aplicar nuevamente nitrógeno desde el aire (por avión).

Antes de sembrar, se inundan los campos hasta un nivel de 5 a 10 centímetros, que se mantendrá durante todo el cultivo. El caudal de entrada del agua se regula mediante pequeñas esclusas o boqueras de acceso. La profundidad del agua en los campos se regula mediante boqueras de desagüe construidas en los márgenes. Por caudal adecuado se entiende aquel que permite inundar unas 40 hectáreas en cuatro o cinco días.

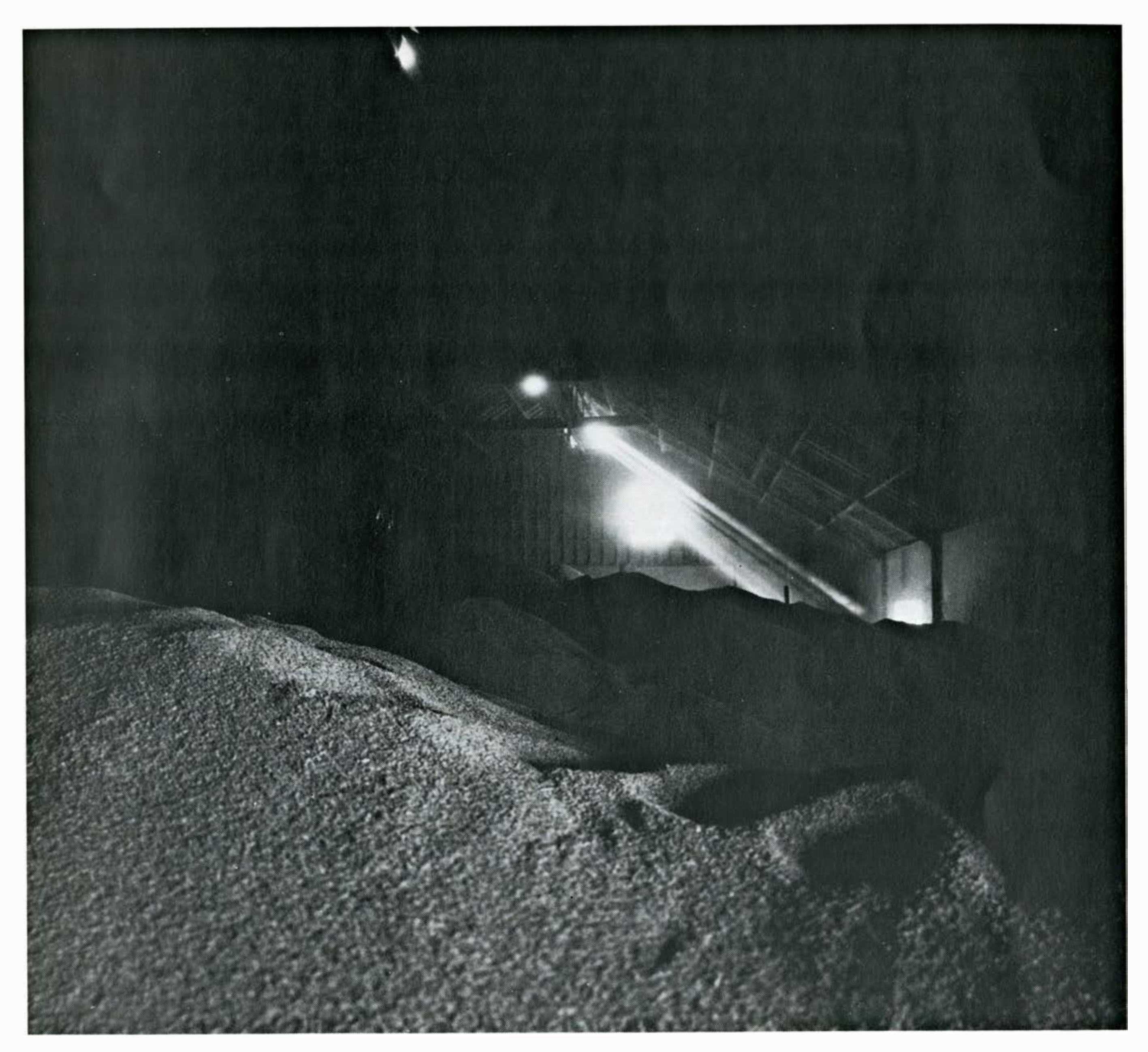
Las semillas se tratan previamente con un fungicida para controlar la podredumbre de las plántulas, y, luego, se ponen a remojo en agua durante 24 horas. Se dejan escurrir entre 12 y 24 horas, se cargan en el avión y se siembran a voleo en los campos inundados, a razón de unos 170 kilogramos por hectárea. El remojo previo persigue dos objetivos: aumentar el peso de los granos para que se hundan en cuanto entren en contacto con el agua del campo e iniciar la germinación. Una pronta germinación proporciona a las plantas ventaja sobre las malas hierbas y las hace más resistentes a las plagas y enfermedades.



CONTROL DE LAS ENFERMEDADES producidas por hongos en California. Dependía fundamentalmente de la práctica de quemar la paja del arroz, abandonada en los campos, después de la recolección. El quemado destruye el hongo, responsable de la enfermedad conocida por "podredumbre del tallo", que, de otra forma, sobreviviría al invierno. El creciente interés por la contaminación del aire ha obligado a restringir la práctica del quemado de la paja. Se están investigando otros métodos de control del hongo.

Las tres primeras semanas después de la siembra resultan críticas. No se obtendrá un máximo rendimiento por hectárea a menos que haya emergido suficiente densidad de plantas. Las plántulas deben surgir enteramente a través de la capa de agua y acceder al oxígeno del aire antes de que las reservas nutritivas de las semillas se hayan agotado. El oxígeno necesario para las raíces de la planta se difunde desde el aire a través de los estomas de las hojas y de aquí hacia las raíces, por capilaridad intracelular.

El control químico de las malas hierbas es esencial para que el cultivo del arroz sea rentable. El ambiente acuático del cultivo favorece el desarrollo de infestaciones de malas hierbas acuáticas que pueden reducir el rendimiento productivo de forma acusada. Los tratamientos químicos para combatir las malas hierbas se realizan con rapidez por medio de aviones. Todos los tratamientos con productos químicos empleados en los campos de arroz están sujetos a una firme regulación gubernativa, para evitar la contaminación potencial de las aguas superficiales que vuelven a aprovecharse curso abajo. Como es lógico, el número de pesticidas, herbicidas incluidos, homologados como tolerables para el cultivo del arroz está rigurosamente limitado. En consecuencia, el desarrollo de medidas aceptables para el control de las malas hierbas constituye uno de los problemas más graves con que se encuentra el agricultor arrocero.



DESPUES DE LA RECOLECCION, el arroz se lleva a las instalaciones de secado. Allí, una moderada corriente de aire caliente, insuflada desde la parte inferior, reduce la humedad del grano desde el 20 al 24 por ciento hasta el 14 por ciento, el nivel requerido para su almacenamiento y elaboración.

En la práctica, se combina la regulación adecuada del agua con la aplicación limitada de los herbicidas. Un nivel constante de agua de 5 a 10 centímetros, sumado a una aportación de un herbicida tiocarbámico, disminuye de forma acusada las infestaciones de mijo japonés (*Echinochloa crusgalli*), que es el problema más serio en cuanto a malas hierbas se refiere. La continua inundación del terreno impide las infestaciones de *Leptochloa fascicularis*, que pueden ser serias cuando el campo se desagua durante las primeras fases del cultivo de la planta de arroz. Aunque en menor escala, otros problemas de malas hierbas con que tropiezan los campesinos californianos los constituyen las infestaciones de ciperáceas y de varias especies de hoja ancha. Las malas hierbas se controlan bastante bien con herbicidas fenoxiderivados, pero hay ciertas especies de ciperáceas que escapan de la acción de los herbicidas disponibles y reducen notablemente el rendimiento de la producción.

Controladas las malas hierbas e incorporando nuevamente el nitrógeno necesario, poco es lo que le queda por hacer al arrocero en esta fase intermedia del cultivo. Atento a las exigencias de riego, sólo piensa en que el tiempo sea bueno mientras dura el período crítico de formación del polen y de polinización de las plantas. En los tipos de plantación habituales en California, las temperaturas del aire inferiores a 15 grados Celsius o mayores de 40 grados Celsius inhiben considerablemente la formación de los granos. No obstante, las nuevas variedades obtenidas tienen mayor tolerancia a las bajas temperaturas.

Las plantaciones californianas se encuentran, hasta cierto punto, a salvo de las principales plagas y enfermedades que afectan a la mayoría de los arrozales del mundo. Las plagas y enfermedades tropicales, que suelen verse favorecidas por un ambiente húmedo, quedan inhibidas por la condición semiárida de California. La enfermedad más grave del arroz californiano es la podredumbre del tallo, causada por el hongo *Sclerotium oryzae*. La enfermedad aparece normalmente durante

las últimas fases de desarrollo de la planta de arroz, y consiste en pequeñas e irregulares lesiones negruzcas sobre la vaina, cerca de la superficie del agua. A medida que la lesión avanza, va aumentando su tamaño; el hongo penetra en el tallo, llegando posiblemente a quebrarlo, en cuyo caso ocasiona encamado. Las pérdidas de rendimiento debidas a este mal son variables, y sólo algunos campos aislados sufren un daño excesivo. La enfermedad solía controlarse por el quemado de la paja de arroz después de la recolección, lo que producía la destrucción del hongo causante que, de otra forma, invernaría sobre la paja. El creciente interés en impedir la contaminación del aire ha comportado la aparición de restricciones para el quemado de la paja. En contrapartida, se hallan en investigación nuevos métodos de control del hongo, a saber: tratamiento con productos químicos, distintas prácticas de cultivo y mejora de la resistencia genética.

El gorgojo de agua del arroz (*Lissorhoptrus oryzophilus*) constituye una amenaza potencial para las plantaciones californianas. Las larvas del insecto se alimentan de las raíces de la planta de arroz durante unos 50 días, empezando durante la fase de plántula. Su voraz actividad reduce considerablemente el volumen de las raíces, y así las jóvenes plantas no pueden obtener los nutrientes minerales del suelo para su crecimiento y desarrollo. El gorgojo puede paralizar el desarrollo de las plantas y acortar grandemente el rendimiento de la producción. Para controlar la plaga se recurre a un autorizado insecticida carbámico, que se echa en el terreno antes de su inundación.

Otra plaga de la plántula de arroz la tenemos en el renacuajo de camarón (*Triops longicaudatus*), un crustáceo de agua dulce que se desarrolla, a partir de huevos depositados previamente, unos tres días después de haber humedecido el terreno con la inundación inicial de los campos. Se alimenta de los tiernos coleóptilos, recién brotados, que son como las vainas de la primera hoja de las jóvenes plantas, lo que detiene el crecimiento y desarrollo de la mata. Los pesticidas que controlan la plaga son el paratión y el sulfato de cobre, a concentraciones relativamente bajas. De menor importancia son las plagas siguientes: el minador de las hojas de arroz, moscas, orugas negras de polillas y masticadores de las hojas de arroz; para cuyo control se acude a los pesticidas, cuando el daño lo reclama.

Se retira el agua por desagüe de los campos, de 20 a 30 días antes de la recolección. El momento de realizar el desagüe de los campos, como faena previa a la recolección, es crítico para la obtención de máximos rendimientos de arroz de gran calidad. La remoción y desagüe se realizan normalmente cuando los granos de la parte más baja de la panícula se encuentran en la fase de pasta blanda, pero el momento exacto se determina según el estado de madurez del grano, las características de drenaje del terreno, las condiciones climáticas pronosticadas y las características particulares de cada variedad. Un desagüe anticipado, en relación con la madurez del grano, mengua el rendimiento por hectárea y la calidad del grano, y un desagüe tardío puede aumentar los costes de la recolección, debido a que el terreno se encontrará excesivamente húmedo y fangoso.

En California, la recolección ocurre cuando el contenido de humedad de los granos desciende por debajo del 24 por ciento. Grandes cosechadoras, provistas de cadenas en lugar de neumáticos de goma, se desplazan con facilidad por un terreno fangoso. El contenido de humedad del grano no debe descender por debajo del 20 por ciento si se quiere obtener el máximo rendimiento en enteros. Los grandes cilindros de dientes de la trilladora que desprenden el grano de la paja romperían los granos de arroz si estuvieran demasiado secos cuando llega el momento de la recolección. Además, el trasiego de humedad hacia el interior y la parte exterior del grano, que está demasiado seco, puede ocasionar su resquebrajamiento y hacerlo más susceptible al daño durante la elaboración. Las cosechadoras recogen unas 4 o 6 hectáreas por día, según la proporción de plantas encamadas. Un remolque recibe el arroz cosechado desde la cosechadora en marcha y lo transporta a los camiones que esperan en el camino. Los remolques son, en realidad, vehículos-cisterna autopropulsados con las cuatro ruedas motrices, habilitados para desplazarse por el terreno fangoso. El grano de arroz cosechado se conduce a los secadores de la localidad o a los silos de la finca, donde la humedad se reduce hasta el 13,5 o 14 por ciento para su almacenamiento y elaboración. El arroz se guarda en grandes complejos comerciales de almacenamiento o en los silos de la finca. La estancia debe hallarse ventilada (para impedir el aumento de la humedad, el calentamiento espontáneo y el deterioro de los granos) hasta que se transporte el arroz hasta los molinos de elaboración.

El arroz cáscara se elabora por medio de discos abrasivos giratorios que le quitan la cascarilla y las capas más externas de salvado, que contiene la mayor parte de la grasa y proteínas del grano, resultando lo que se llama arroz blanco elaborado. Arroz cargo, o descascarillado, es el que proviene del arroz cáscara al que se le ha desprovisto de la cascarilla, pero que no ha sido elaborado, por lo que mantiene las capas de salvado. A los agricultores se les paga según el porcentaje de granos enteros que quedan después de la elaboración y el porcentaje de otros productos de la elaboración. Tras el proceso de la elaboración, se obtienen normalmente los siguientes productos: 55 por ciento de granos enteros, 15 por ciento de granos rotos, 20 por ciento de cascarilla y 10 por ciento de salvado. Los granos enteros se usan para alimentación humana, los granos rotos para la fabricación de alimentos infantiles y fermentos, la cascarilla como acondicionante del terreno y como lecho de gallinas y el salvado para piensos.

El grueso de la producción arrocera californiana se elabora y comercializa en cooperativas de los propios campesinos, aunque también hay molineros que la gestionan por su cuenta. El precio pagado a los agricultores se basa en el rendimiento total de elaboración, correspondiendo el precio mayor a los granos enteros elaborados. Los precios más bajos corresponden a los granos rotos de arroz blanco elaborado y otros subproductos del arroz. El precio interior está en relación con los mercados internacionales del arroz. Puesto que la producción estadounidense no llega al 2 por ciento mundial, apenas si influye en los planes de producción arrocera total. Dicho de otra forma, cuando la producción mundial es baja, se disparan espectacularmente los precios. Y a la inversa, cuando la producción mundial es alta, los precios pueden descender de forma brusca. De lo que antecede resulta que los arroceros estadounidenses ejercen un control mínimo sobre el dinero que reciben por su cosecha. Ahora bien, puesto que aproximadamente el 60 por ciento de la cosecha nacional se destina al mercado exterior, los Estados Unidos constituyen el principal exportador de arroz en todo el mundo. Cuando sucesos catastróficos interrumpen la producción, y con ello el abastecimiento de arroz de los principales países consumidores, la producción norteamericana se hace indispensable.

El nucleosoma

La subunidad elemental de la estructura de los cromosomas es una superhélice de ADN devanada sobre una canilla constituida por proteínas histonas. ¿Cómo se llegó al descubrimiento del nucleosoma y a la determinación de su estructura?

Roger D. Kornberg y Aaron Klug

Los cromosomas, portadores de la información genética en las células superiores, cuando se observaron por primera vez a través del microscopio, hace ya 100 años, aparecieron como cuerpos densos, filiformes, desplazándose en dos grupos hacia los polos opuestos de las células en división. Los cromosomas podían apreciarse mientras cada grupo se incorporaba en cada una de las dos células hijas y quedaba encerrado dentro de un núcleo rodeado por una membrana. Sucedía, a continuación, un extraño fenómeno: ¡los cromosomas parecían desvanecerse! No es que se esfumaran, por supuesto. Simplemente se transformaban en estructuras tan delgadas y difusas que escapaban a las posibilidades visualizadoras del microscopio. Partiendo de una textura altamente condensada durante la división celular, para facilitar su desplazamiento y equipartición, los cromosomas se desplegaban, dejando expuesta la información genética indispensable para el crecimiento y función de las células hijas.

La información de los cromosomas se distribuye en unidades llamadas genes. En una típica célula animal o vegetal, miles de ellos se disponen a lo largo de su material cromosómico. Los genes especifican la estructura de las proteínas, que a su vez realizan las funciones celulares. Estas funciones difieren según los distintos tipos de células: células de la sangre, del hígado, del cerebro, etcétera. Las proteínas que cada tipo de célula elabora son, por consiguiente, distintas, pero todas las células de un organismo contienen los mismos genes. Lo que varía de una célula a otra y de un momento dado a otro es qué genes se expresan, es decir, se traducen en proteínas. La necesaria selectividad en la expresión de la información genética va acompañada por la selectividad en el despliegue de los cromosomas, aunque puede también ser su consecuencia; solamente las regiones génicas que deben expresarse en una célula determinada en un momento dado se hallan totalmente desplegadas y expuestas. La gran variedad de tipos celulares se refleja, pues, en una extraordinaria diversidad de formas y estructuras cromosómicas. ¿Cuál es el fundamento de esta diversidad? La flexibilidad estructural de los cromosomas no sólo debe satisfacer la expresión selectiva, sino que también ha de prever la inclusión (en el interior de un núcleo celular de un diámetro menor de una centésima de milímetro) de un material cromosómico que posee una longitud total, en su forma más expandida, de unos dos metros. ¿Qué principios soportan esta flexibilidad estructural?

Este artículo describe las investigaciones, realizadas por nosotros y por otros autores, que han conducido al postulado de uno de estos principios. Nuestro trabajo se ha desarrollado fundamentalmente en el Laboratorio de Biología Molecular del Medical Research Council de Cambridge a lo largo de unos ochos años, a menudo conjuntamente, aunque en su mayor parte de forma independiente y en momentos distintos. Hemos disfrutado de la estrecha colaboración de varios colegas: Jean O. Thomas, de la Universidad de Cambridge, Marcus Noll, actualmente en la Universidad de Basilea, y John T. Finch, del Laboratorio de Biología Molecular. En bien de la simplicidad de lo que sigue nos ceñiremos en la mayoría de los casos al colectivo "nosotros", en lugar de recurrir en cada ocasión a identificar cada fase de la descripción con uno u otro de los autores o de los colaboradores.

Los primeros estudios sobre los cromosomas se polarizaron en la incógnita de su composición. Los cromosomas de las células superiores están formados por una substancia conocida por cromatina, que comprende dos tipos de compuestos químicos: proteína y el ácido nucleico ADN. Aunque la proteína es el componente más abundante, toda la información genética de la cromatina está contenida en el ADN. ¿Por qué existe entonces tanta proteína? Esta cuestión resulta particularmente sorprendente si se considera la naturaleza de la proteína. A principios de la década de 1970 quedó establecido, a través del trabajo de muchos investigadores, que el componente proteico de la cromatina constaba, básicamente, de cinco tipos de proteínas, conocidas por histonas. Las mismas cinco histonas se encuentran en un amplio abanico de organismos eucarióticos (organismos cuya cromatina está contenida en un núcleo), desde los más simples, como las levaduras y los mohos, hasta los más complejos, hombre incluido. Uno de los objetivos prioritarios ha sido desvelar el misterio de las histonas: determinar su localización en el cromosoma y precisar su cometido.

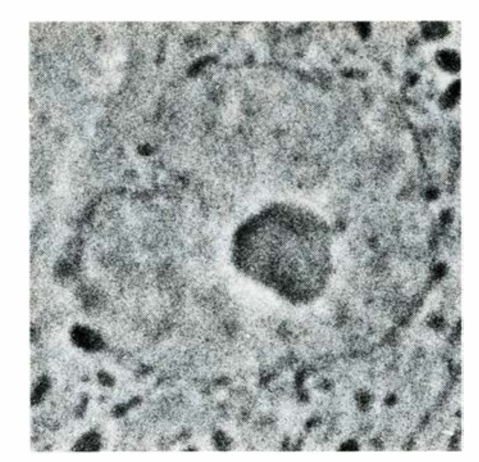
La primera indicación referente al cometido de las histonas la aportaron, hace casi 20 años, los estudios de difracción de rayos X sobre cromatina efectuados por Maurice F. Wilkins, del King's College de la Universidad de Londres, y Vittorio Luzzati, del Centro de Genética Molecular de París, y sus colegas. La difracción de rayos X es una técnica adecuada para el estudio de estructuras reiterativas (por ejemplo, cristales), en las que una distribución de átomos o moléculas se repite una y otra vez en una disposición tridimensional. Wilkins y Luzzati obtuvieron un resultado sorprendente: consiguieron pruebas de una estructura repetitiva en la cromatina. El grado de ordenamiento resultaba modesto en comparación con el de los cristales; con todo, la periodicidad no ofrecía dudas. Idéntica periodicidad se apreciaba también en una mezcla de histonas y ADN. El análisis de los datos de rayos X indicaba que la periodicidad poseía intervalos de cerca de 100 angstrom (un angstrom

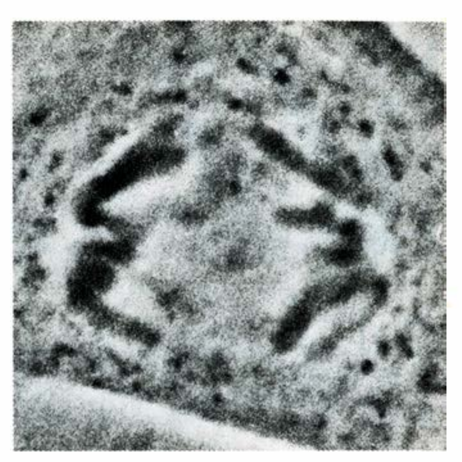
equivale a 10^{-10} metros, o sea, una diezmillonésima de milímetro).

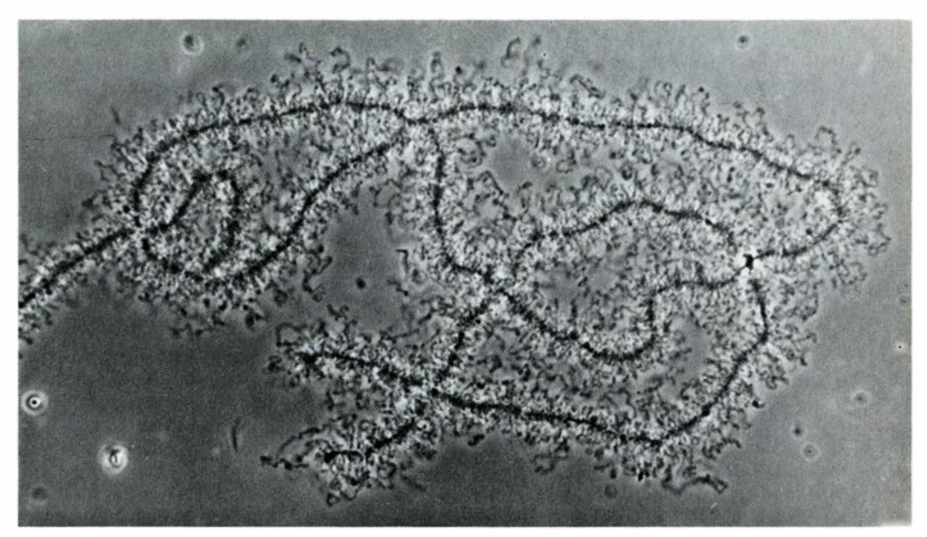
Para comprender este ordenamiento de la cromatina es necesario considerar la estructura de las proteínas y del ADN. Una proteína es una cadena constituida por 20 tipos distintos de sillares, llamados aminoácidos. La cadena se dobla espontáneamente sobre sí misma de una forma inducida con gran precisión por la secuencia de aminoácidos. La estructura plegada suele ser muy compacta, salvo en ciertas cavidades o protuberancias de la superficie que sirven de lugares para la unión selectiva de otras moléculas. Mediante este procedimiento de enlace, las proteínas realizan su función. Por ejemplo, los enzimas se unen a otras moléculas y así catalizan su transformación química; los anticuerpos desempeñan un cometido clave en la respuesta inmune uniéndose a cualquier substancia extraña que penetre en el organismo. Las histonas realizan su función en la cromatina uniéndose al ADN mediante una interacción iónica: muchos de sus aminoácidos están cargados positivamente, y se asocian con los grupos cargados negativamente en el ADN.

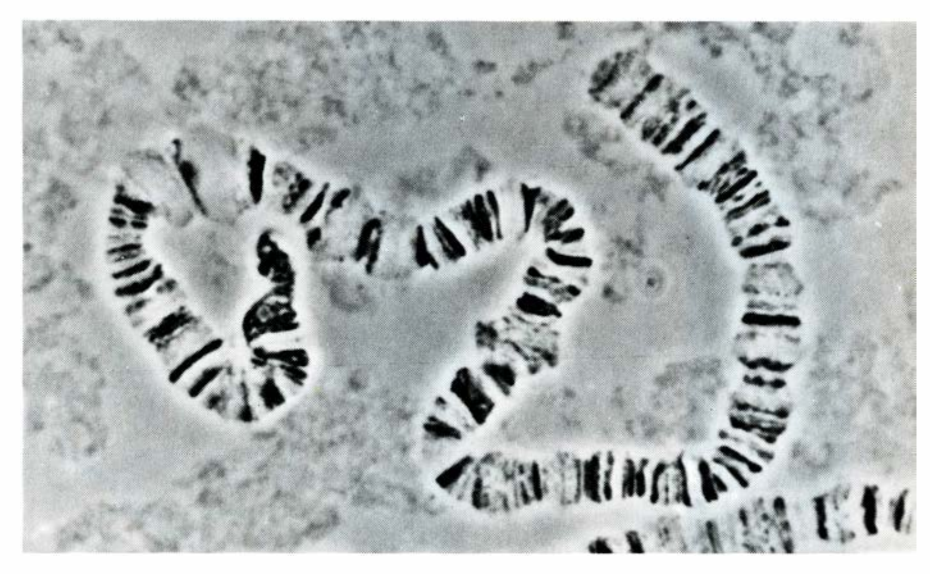
Las consecuencias que comporta la configuración del ADN son profundas. El ADN es largo y delgado; una sola molécula del cual ocupa la longitud de un cromosoma. La molécula de ADN consta de dos cadenas, formadas por los llamados nucleótidos, cuya secuencia constituye el mensaje genético. Las cadenas están entrelazadas y la doble hélice resultante, a modo de un cable, es sensiblemente rígida. Aunque esta fina varilla carece de elementos que se repitan a intervalos de 100 angstrom, cuando el ADN se combina con las histonas en la cromatina se detecta una periodicidad estructural cada 100 angstrom. Ello podría explicarse arguyendo que las histonas se unen al ADN de suerte que lo fuerzan a adoptar un plegamiento o enrollamiento, dotado de una periodicidad de 100 angstrom, plegamiento que cumpliría así una función arquitectónica necesaria para la organización del ADN en la cromatina.

Dean R. Hewish y Leigh A. Burgoyne, de la Universidad de Flinders de Australia meridional, obtuvieron, en 1973, un tipo de pruebas totalmente distinto, si bien abocaban a una conclusión similar, al encontrar una nucleasa (un enzima que rompe moléculas de ADN) en los núcleos de células hepáticas de rata. Los fragmentos de ADN generados por la nucleasa se sometieron a análisis por la técnica de electro-

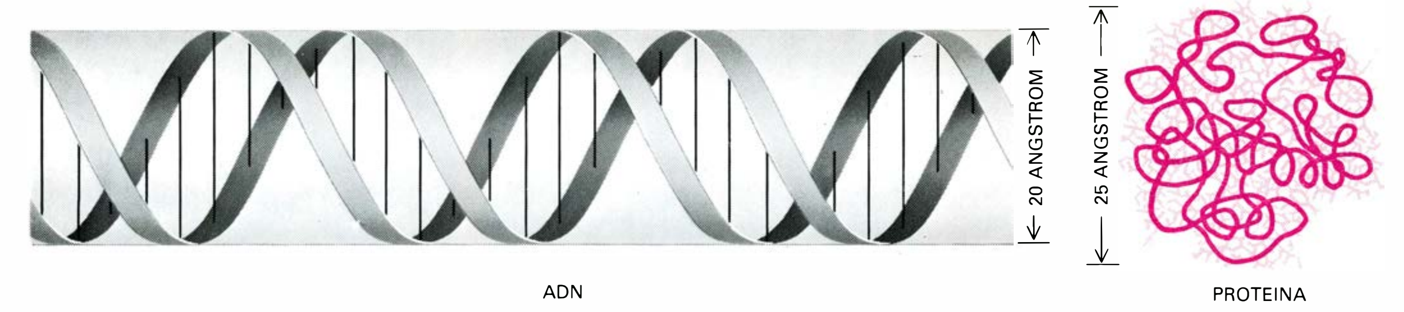








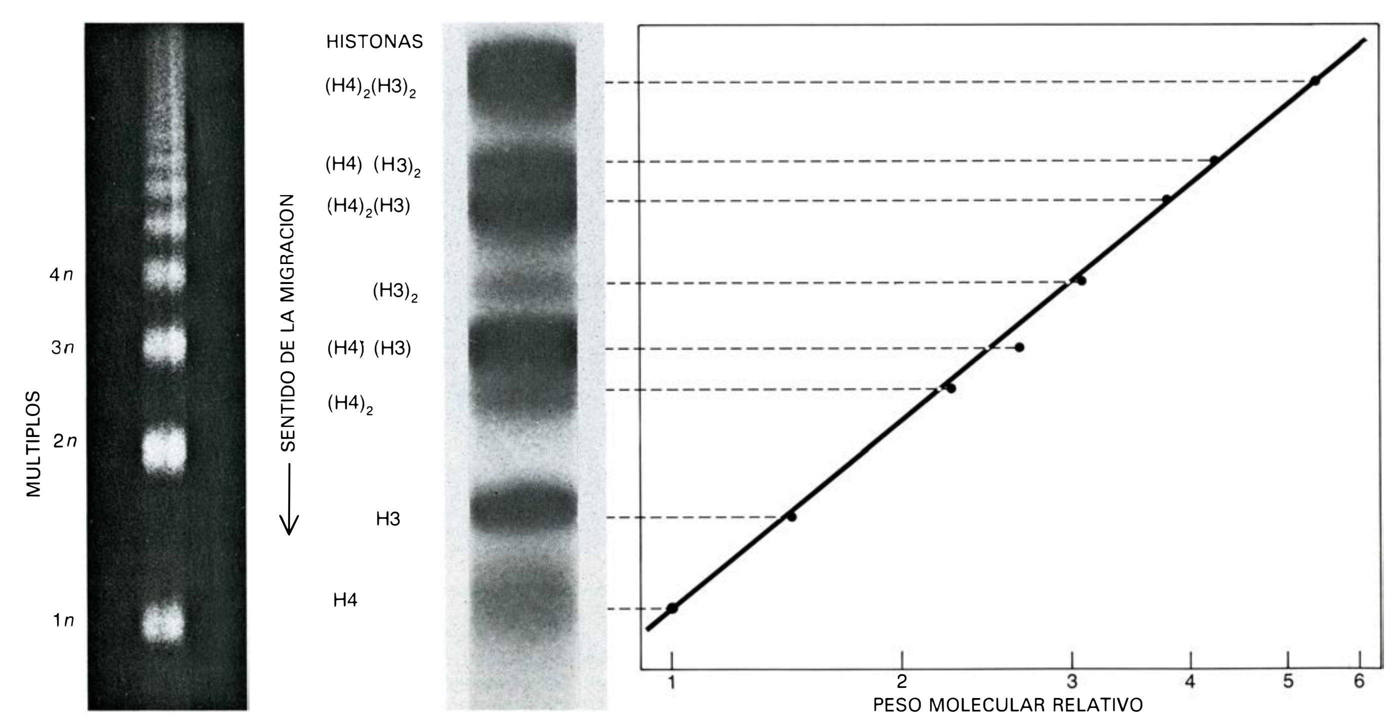
CROMOSOMAS de organismos superiores. Se trata de unas estructuras que exhiben múltiples conformaciones. En el núcleo celular activo de una rata canguro (*arriba, a la izquierda*), aumentado unos 3000 diámetros en la micrografía tomada por Susan Stallman y Zacheus Cande, de la Universidad de California en Berkeley, el material cromosómico aparece en un estado muy extendido y difuso por todo el núcleo, lo que impide su apreciación. (El disco oscuro corresponde al nucleolo.) En la célula en división de la rata canguro (*arriba, a la derecha*), los cromosomas aparecen fuertemente condensados, a modo de objetos rugosos en forma de *V*. Estos dos extremos de la condensación cromosómica se observan, en el momento adecuado, en las células de todos los tejidos. Existen, además, formas especiales de cromosomas dotados de estructuras muy distintas. Los cromosomas plumosos, que se detectan en células germinales de muchos animales, representan un estado activo, donde los genes que deben expresarse se disponen a lo largo de bucles que irradian desde el eje central. Un cromosoma plumoso procedente de un ovocito de tritón aparece aumentado 375 diámetros en la micrografía tomada por Joseph G. Gall, de la Universidad de Yale (*centro*). En las células de las larvas de díptero se observan cromosomas politénicos. Se trata de cromosomas constituidos por centenares de copias de un cromosoma único, alineadas con una precisión exquisita. Un cromosoma politénico de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* aparece aumentado 2500 diámetros en una micrografía (*abajo*) tomada por G. Lefevre, de la Universidad de Northridge.



POR CROMATINA se entiende el material cromosómico de las células de los organismos superiores. Consta de ADN y proteínas; entre éstas, las cinco clases de histonas. La molécula ADN, cuya forma recuerda la de un bastoncillo, es una doble hélice constituida por dos cadenas de nucleótidos cuyas secuencias contienen la información genética; aquí, la estructura tubular es una cinta que envuelve los grupos químicos más externos de las dos cadenas. Una proteína (*dibujada muy esquemáticamente*) es una cadena de 20 tipos de subunidades aminoacídicas; la cadena principal aparece en trazo grueso.

foresis en gel, en la que las moléculas migran a través de una matriz porosa bajo la influencia de un campo eléctrico. El efecto de cedazo de la matriz selecciona las moléculas por tamaños: las moléculas pequeñas migran a través del gel más deprisa, y más lejos, por consiguiente, que las de mayor tamaño. Hewish y Burgoyne se encontraron con que los fragmentos de ADN desgajados de la cromatina por la nucleasa de hígado de rata constituían una distribución regular de bandas en el gel: en la distribución se apreciaba que los fragmentos eran múltiplos dobles, triples, cuádruples, etcétera, de un tamaño unitario más pequeño. Este resultado ofrecía un manifiesto contraste con el rastro uniforme dejado a lo largo del gel por los fragmentos producidos por la nucleasa en ADN libre. En otras palabras, la nucleasa de rata rompía la cromatina en lugares espaciados a intervalos regulares a lo largo del ADN, mientras que el ADN libre era degradado al azar. Hewish y Burgoyne razonaron que las proteínas de la cromatina producían, de alguna manera, un efecto regular de protección contra la nucleasa; por consiguiente, las proteínas debían hallarse distribuidas de un modo uniforme a lo largo del ADN.

Mirando hacia atrás, advertimos que los resultados de la difracción de rayos X y de la digestión por nucleasa contenían ya la solución al problema ADN-histonas, pero la cuestión no estaba, ni mucho menos, tan clara en aquel momento. Los resultados plantearon más interrogantes que respuestas aportaron. ¿Podían explicarse ambos resultados mediante un plegamiento periódico del ADN? ¿Se debían, por contra, a una periodicidad de las proteínas, sin ninguna constricción estructural del ADN? ¿Guardaban siquiera los dos resultados alguna relación entre sí? Si la respuesta tenía que ver con el plega-



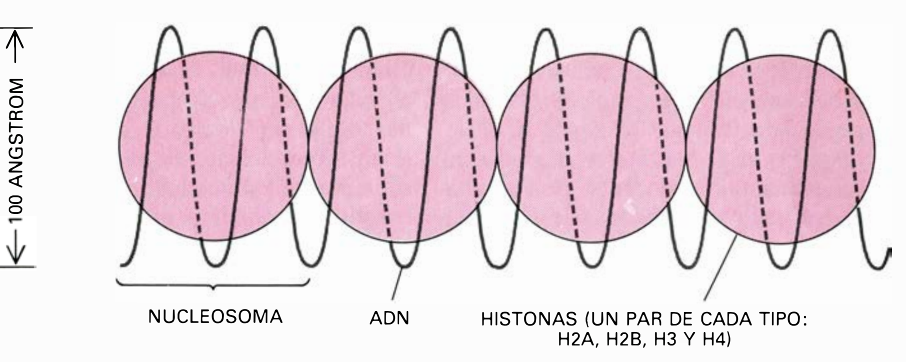
ENSAYO DE ELECTROFORESIS EN GEL para separar las moléculas en razón de su tamaño, a medida que emigran a través del gel a una velocidad inversamente proporcional al logaritmo de su peso molecular. Dicha técnica suministró las primeras pruebas relativas a la existencia de nucleosomas (*izquierda*) y reveló las primeras pistas en torno a su composición (*derecha*). Cuando la cromatina se digiere con una nucleasa y se separan y someten a electroforesis los fragmentos de ADN resultantes (*izquierda*), éstos forman una distribución de bandas definidas, detectables mediante un colorante fluorescente. Las bandas corresponden a múltiplos de un tamaño unidad, de una longitud en pares de nucleótidos equivalente a 1*n* (*abajo*). La distribución indica que la nucleasa incide en regiones regularmente espaciadas de la cromatina: entre nucleosomas. En un experimento de entrecruzamiento (*derecha*) se expuso una mezcla de las dos proteínas histonas H3 y H4 a un reactivo que formaba enlaces covalentes entre las cadenas de un agregado proteico; los productos no entrecruzados se separaron con un detergente. Al separar los productos entrecruzados por electroforesis y teñirlos con un colorante se detectaron ocho bandas, que correspondían, en tamaño, a las ocho moléculas monómeros de H3 y H4 y los entrecruzamientos del tetrámero de H3 y H4.

miento, ¿cuál era entonces el modelo de doblado de la varilla de ADN? De ser las proteínas responsables de los resultados de los rayos X y de la digestión con nucleasa, ¿se trataba de histonas? En caso afirmativo, ¿estaban implicadas las cinco histonas o solamente algunas de ellas? Todas estas incógnitas se complicaban aún más debido a la extendida creencia, entre muchos investigadores, de que las histonas eran, en cierta manera, responsables de la diversidad de la estructura cromosómica y de la expresión génica. Una distribución periódica simple de las histonas a lo largo del ADN sería incompatible con el mencionado cometido; más verosímil sería que en regiones diferentes de un cromosoma se hallasen distintas combinaciones de las cinco histonas, dando lugar a una estructura de gran complejidad y altamente variada.

Frente a esta incertidumbre generalizada, Wilkins y sus colegas elaboraron una propuesta específica de plegamiento periódico del ADN para explicar la difracción de los rayos X por la cromatina. En su opinión, la doble hélice del ADN se enrollaba sobre sí misma formando una hélice mayor con una periodicidad, o distancia entre giros a lo largo de su longitud, de alrededor de 100 angstrom. Se supuso que las histonas participaban de alguna forma en esta estructura "superhelicoidal", pero no se especificaba en detalle su modo de acción.

Aunque el modelo de la superhélice era coherente con los datos de la difracción, no cosechó muchos adeptos. No se cuestionaba tanto el modelo, cuanto la escasez de datos. Muchas formas distintas de plegamiento del ADN satisfacían la repetición a intervalos de 100 angstrom y concordaban, por tanto, con los datos. En 1971, F. H. C. Crick y uno de nosotros (Klug) iniciaron, en el Laboratorio de Biología Molecular, un análisis teórico de alternativas al modelo de la superhélice. El otro coautor (Kornberg) llegó a Cambridge en 1972 y se concentró en la difracción de rayos X de la cromatina, con la esperanza de que algún nuevo resultado ayudase a decidir entre las estructuras alternativas. Mantuvimos la ilusión por algún tiempo, siempre creyendo que el siguiente diagrama de difracción aportaría la solución; y así, durante un año. Mas después de quizás un centenar de diagramas de difracción, el planteamiento directo no nos había aproximado un ápice a la solución.

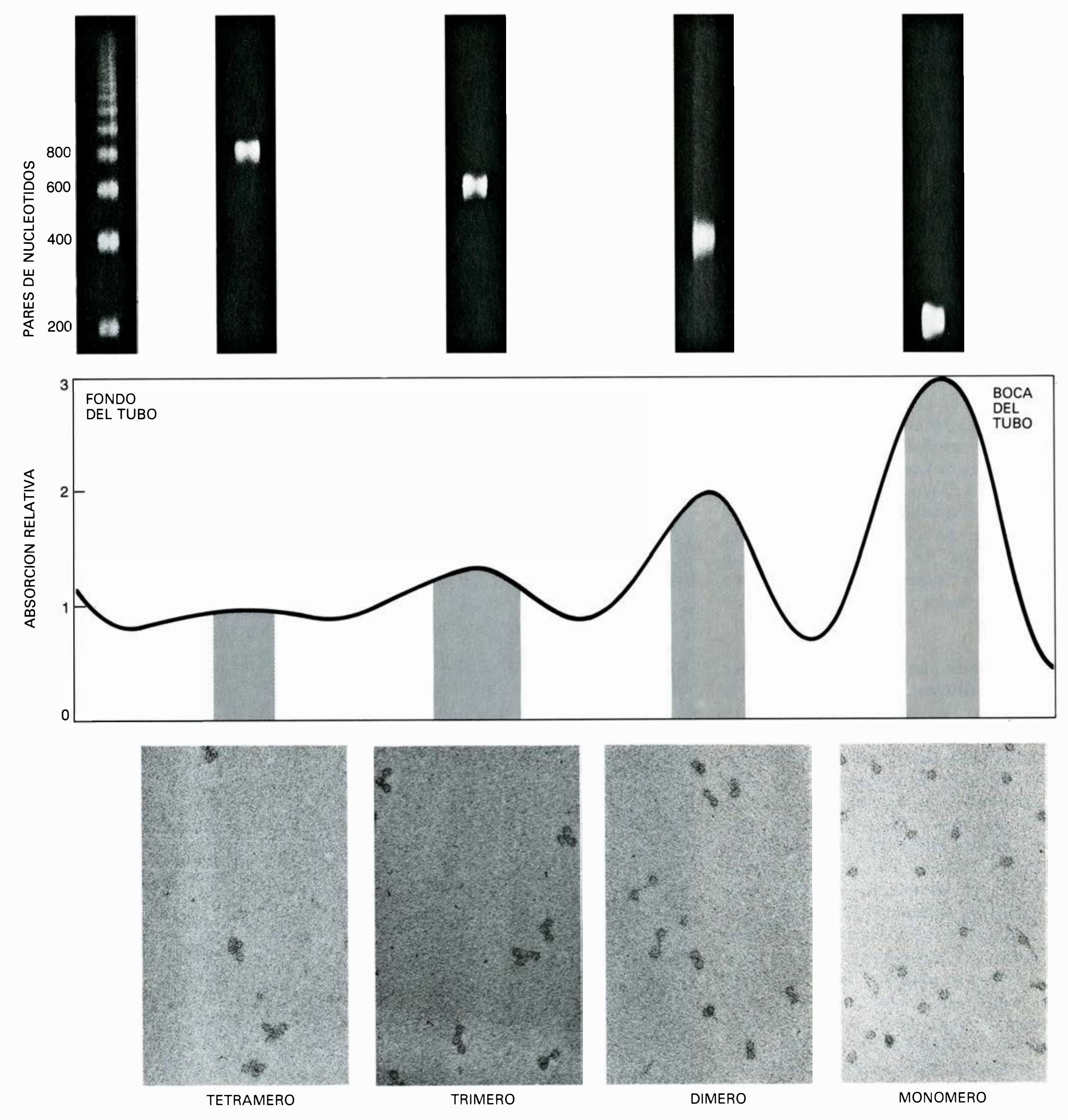
A pesar de todo, los ensayos realizados con rayos X fueron provechosos,



PROPUESTA DE 1974, que fue la original, para explicar la estructura de la fibra de cromatina de 100 angstrom de ancho. Mostraba segmentos sucesivos de ADN de 200 pares de nucleótidos enrollados sobre una serie de cuentas: octámeros compuestos de dos moléculas de cada una de las cuatro histonas H2A, H2B, H3 y H4. En aquel momento no se conocía todavía la conformación real del complejo de histonas.

FIBRAS DE CROMATINA. Parecían fragmentos de un rosario con las cuentas muy espaciadas, en las micrografías electrónicas tomadas por Ada L. Olins y Donald E. Olins, de la Facultad de Ciencias Biomédicas de la Universidad de Tennessee en Oak Ridge. En esta micrografía, también de los Olins, la cromatina procedente del núcleo de un eritrocito de pollo se ha teñido negativamente con acetato de uranilo. Su aumento ronda los 325.000 diámetros. Se distendió la cromatina a lo largo del proceso preparativo, aumentando la separación entre nucleosomas y, en consecuencia, favoreciendo su distinción.

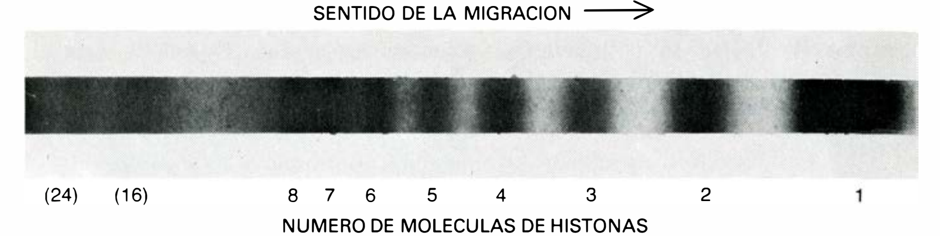
pues simultáneamente intentamos reconstituir cromatina a partir de ADN y de histonas aisladas, empleando el diagrama característico de rayos X de la cromatina para reconocer el grado de reconstitución alcanzado. Se trataba de averiguar qué histonas se hallaban implicadas en el plegamiento o enrollamiento del ADN. Cuando el ADN se mezclaba con una preparación de histonas totales sin fraccionar, se obtenía casi un 90 por ciento de reconstitución; sin embargo, todos los intentos de reconstituir cromatina mezclando ADN con un juego completo de las cuatro especies de histonas purificadas independientemente resultaron fallidos. Concluimos que el procedimiento de separación de las histonas provocaba su desnaturalización, o sea: la conformación "nativa" de las proteínas, plegada



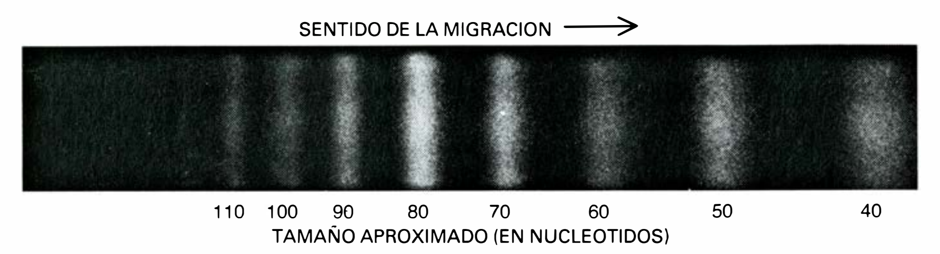
SUBUNIDADES FISICAS Y QUIMICAS de cromatina, identificadas por análisis bioquímico y microscopía electrónica, respectivamente. Estos experimentos demostraron la correspondencia entre las observaciones microscópicas y las bioquímicas. Los productos de la digestión parcial de cromatina con nucleasa micrococal se fraccionaron por ultracentrifugación en gradientes de sacarosa, que separan los complejos ADN-histona por su tamaño; al examinar el gradiente con radiación ultravioleta (*centro*) se detectaron cuatro máximos de absorción. Se sometió el ADN extraído de cada pico (*regiones sombreadas*) a electroforesis en gel (*arriba*), en muestras separadas; éstas se calibraron por comparación con una muestra de digerido de nucleasa sin fraccionar (*izquierda*). El ADN de cada fracción daba una sola banda, que se correspondía con el tamaño de la unidad de 200 pares de nucleótidos (*derecha*), o bien con un dímero, trímero o tetrámero de dicha unidad. En las micrografías electrónicas (*abajo*) del material obtenido de cada fracción se apreciaban unidades individuales en forma de cuentas en la fracción más ligera (*derecha*), pares de cuentas (dímeros) en la fracción contigua más pesada, y así sucesivamente.

compactamente, y que era indispensable para su correcta actuación, se desmoronaba. Era evidente que se hacía perentorio un método más suave para la extracción de las histonas.

Caímos entonces en la cuenta de una observación realizada un año antes por Deneys R. van der Westhuyzen y Claus von Holt, de la Universidad de Ciudad del Cabo, quienes se habían propuesto separar la mezcla de histonas obtenida de cromatina en los cinco tipos elementales de histona: H1, H2A, H2B, H3 y H4. La separación resultaba difícil debido a la semejanza de las histonas. Las cadenas de estas proteínas poseen una longitud parecida (excepción hecha de la H1, que es unas dos veces más larga que las demás) y una composición en aminoácidos también muy similar, con un 20 por ciento de aminoácidos cargados positivamente y los restantes mayoritariamente neutros. La separación de histonas se complica además por su tendencia a agregarse entre sí. La agregación puede normalmente evitarse con ácidos concentrados o con urea, pero estos reactivos suelen desnaturalizar las proteínas. Van der Wethuyzen y von Holt se desviaron de la práctica común e intentaron separar las histonas en condiciones tales que no se alterase la estructura nativa plegada. Así, filtraron una mezcla de histonas a través de una columna de partículas porosas de gel y consiguieron una nítida separación en dos grupos. Un grupo compuesto por H1, H3 y H4 fue el primero en eluirse de la columna; en el segundo grupo había H2A y H2B.



CROMATINA tratada con un reactivo de entrecruzamiento y sometida a electroforesis. Las bandas revelan la presencia de monómeros de histonas (*1*) y todos los entrecruzamientos intermedios hasta el nivel de octámero (*8*). (En la escala de este gel no podía discernirse entre las distintas clases de histonas.) El resultado manifiesta que las histonas aparecen fuertemente asociadas en conjuntos de ocho. Las bandas tenues, próximas a la parte superior del gel, representan, probablemente, dímeros y trímeros.



FRAGMENTOS DE ADN monocatenario desgajados de la cromatina con ADNasa I pancreática (en lugar de nucleasa micrococal) y separados por electroforesis en gel. Forman bandas discretas en posiciones correspondientes a múltiplos de unos 10 nucleótidos. Según parece, el enzima sólo puede atacar un lado de la doble hélice de ADN, cuya periodicidad es de unos 10 nucleótidos por vuelta; el otro lado queda protegido por el núcleo de histonas del nucleosoma. En otras palabras, este experimento pone de manifiesto que el ADN se localiza en la superficie del nucleosoma, arrollándose sobre el núcleo de histonas.

Nos intrigaba la posible significación de este resultado. En la filtración a través de geles, las moléculas pequeñas pueden penetrar en los poros de las partículas de gel, mientras que las moléculas grandes quedan excluidas, rodean las partículas y descienden más aprisa por la columna. (Esta situación es opuesta a la que se presenta en la electroforesis en gel, pues el gel es continuo, no fragmentado en partículas y por ello todas las moléculas deben penetrar en él; lo que explica que las moléculas grandes se muevan más lentamente que las pequeñas.) El comportamiento de las histonas en la columna de filtración por gel era sorprendente, por cuanto la H3 y la H4 se eluían a la misma velocidad que la histona H1, aunque su tamaño fuese la mitad del de ésta. Se pensó en la posibilidad de que la H3 y la H4 se asociasen naturalmente formando un dímero, o molécula doble, del mismo tamaño que el monómero de H1. Aunque la idea de un dímero H3-H4 no constituía la única explicación razonable de los resultados de filtración en gel, como tampoco resultaba inmediatamente aparente su significación para la estructura de la cromatina, sí representó algo definido en un momento en que poco podía escogerse. Decidimos comprobar su verosimilitud. Al final, resultó ser sólo una verdad a medias.

Al reproducir los experimentos de reconstitución del complejo ADN-histonas comprobamos que el material preparado mediante ese procedimiento suave de separación era, ciertamente, funcional. El agregado H3-H4 obtenido de la columna de filtración, mezclado con H2A y H2B (procedentes de la misma columna o de un experimento separado) y añadido al ADN, daba lugar, de forma coherente, a una cromatina que reproducía el diagrama nativo de rayos X.

La etapa siguiente consistió en investigar un dímero H3-H4. Se sumó al proyecto Jean Thomas, ocupada por entonces de las asociaciones entre proteínas a través del método del "entrecruzamiento químico". En la versión más eficaz de este procedimiento, elaborada por Gregg E. Davies y George R. Stark, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, se trata una solución de proteína con un reactivo imidoéster bifuncional. Los imidoésteres forman uniones estables con los grupos amino de las proteínas; cuando una molécula del reactivo bifuncional se combina con los grupos amino de dos cadenas adyacentes de un agregado de proteínas, se forma un híbrido de tamaño igual a la suma de los tamaños de las dos cadenas. El híbrido puede detectarse por disolución en SDS (un detergente que separa moléculas no enlazadas de un agregado de proteínas y despliega la configuración compacta de las cadenas), seguida de electroforesis en gel, donde las cadenas se separan según su tamaño. Confiábamos en que el tratamiento con imidoéster del supuesto dímero H3-H4 y el subsiguiente análisis en geles revelasen tres tamaños de moléculas en forma de bandas en los geles, una banda correspondiente al entrecruzamiento de H3 y H4 y las otras dos bandas debidas a las H3 y H4 aisladas, no entrecruzadas por el reactivo. Para nuestro asombro, al realizar el experimento no encontramos tres bandas, sino ocho. Estas últimas correspondían, por su tamaño, a H3, H4, H3-H3, H3-H4, H4-H4, H3-H3-H4, H3-H4-H4 y H3-H3-H4-H4. Al reflexionar sobre ello advertimos que los resultados podían interpretarse como todas las fases intermedias de entrecruzamiento para un agregado compuesto de dos H3 y dos H4. Es decir, los resultados podían explicarse con simplicidad si las H3 y H4 estuviesen presentes no como un dí-

mero, sino como dos pares de dímeros: un tetrámero $(H3)_2$ $(H4)_2$. Experimentos posteriores confirmaron justamente que la única combinación presente era ese tetrámero.

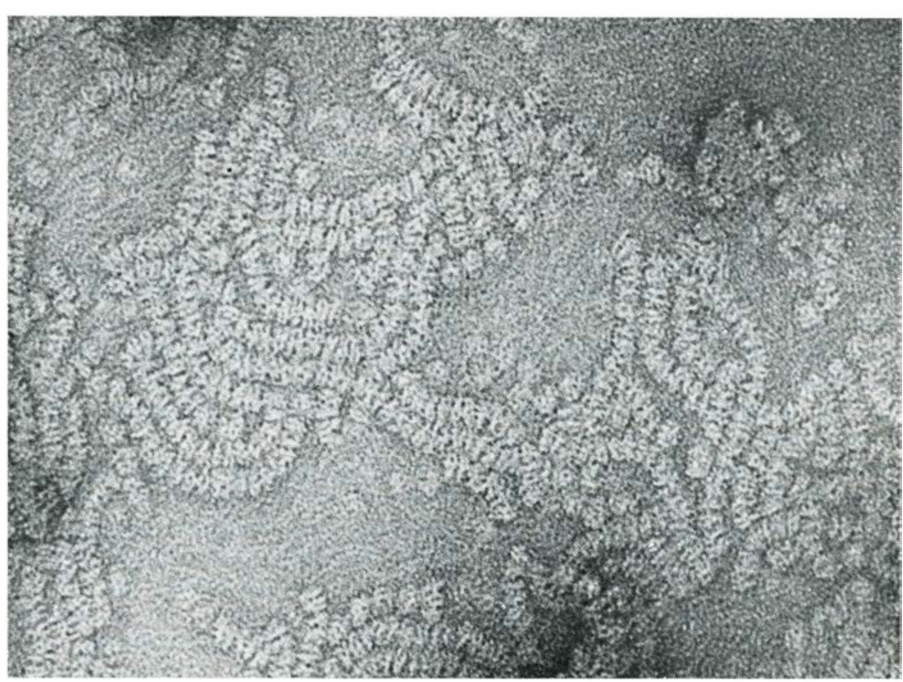
¿Qué implicaciones cabía esperar en la estructura de la cromatina? La homogeneidad del tetrámero (el hecho de que toda la H3 y la H4 se hallasen en forma de un solo tipo de agregado molecular) apuntaba hacia una unidad estructural singular. La posible correlación de las restantes histonas y del propio ADN con esta unidad podía conjeturarse a partir de su relación cuantitativa con las H3 y H4. La cromatina de la mayoría de los organismos posee aproximadamente igual número de moléculas de H2A, H2B, H3 y H4, correspondiendo cerca de 25 pares de nucleótidos de la doble hélice de ADN por cada una de estas moléculas. Si la cromatina estuviese integrada por muchas unidades idénticas, cada una de ellas basada en un tetrámero $(H3)_2$ $(H4)_2$, las unidades deberían contener dos moléculas de cada una de las cuatro histonas, formando un octámero, y 200 pares de nucleótidos de ADN.

Una implicación adicional de la forma tetramérica de las H3 y H4 se deducía de su semejanza con otras proteínas, como por ejemplo la hemoglobina, proteína que transporta el oxígeno en la sangre. La hemoglobina está constituida por dos tipos de cadenas aminoacídicas, designadas alfa y beta. Ambas forman un tetrámero: dos cadenas alfa y dos beta. Las estructuras de la hemoglobina y de otras muchas proteínas de cadenas múltiples se han establecido a nivel atómico por difracción de rayos X, y de este análisis se ha desprendido una sorprendente característica, común a todas ellas: se hallan densamente empaquetadas en una configuración casi esférica. No se aprecian en estas estructuras orificios lo bastante espaciosos como para que quepa en ellos una molécula del tamaño del ADN. Prosiguiendo con la analogía, si el conjunto de histonas de la unidad estructural de un cromosoma (ocho moléculas de histonas, dos de cada uno de los cuatro tipos) es un complejo sólidamente empaquetado, el ADN asociado con las histonas debe estar unido a la parte exterior del complejo; una única y larga molécula de ADN, extendida a lo largo del cromosoma, pasaría de un juego de histonas, o unidad estructural, al siguiente. La imagen de un cromosoma se asemeja entonces a una cadena de unidades esféricas, cual si se tratara de un collar de cuentas que se hallaran muy juntas entre sí.

Para completar la imagen había que conocer sus dimensiones. Lo que sólo podía estimarse de modo aproximado a partir de la información disponible. Dando por válido que la cadena de cuentas correspondía a la estructura repetitiva mostrada por la difracción de rayos X, la distancia entre los centros de las cuentas podía establecerse en 100 angstrom, en consonancia con los datos de rayos X. Se presumía, además, que las cadenas de cuentas correspondían a las fibras de cromatina apreciables en las micrografías electrónicas de cromosomas no condensados. El grosor de estas fibras se cifraba entre 30 y 300 angstrom, siendo 100 angstrom el valor más frecuente, y, por tanto, el que podía asignarse al diámetro de una cuenta.

Lo hasta aquí indicado se movía en el terreno de la especulación hipotética. Las sospechas que uno podría confesar a sus amigos, pero que nunca sometería a juicio crítico. El acontecimiento determinante se produjo con el reconocimiento de que una estructura organizada en forma de collar de cuentas podría justificar los resultados obtenidos por Hewish y Burgoyne en sus experimentos de digestión con nucleasa: la alternancia de ADN en las cuentas con ADN libre en las regiones entre éstas explicaría la distribución regular resultante de la digestión con nucleasa, ya que el ADN libre sería más sensible, sin duda, a la rotura. Los fragmentos resultantes habrían de ser múltiplos integrales del contenido en ADN de una cuenta (es decir, según podría ya predecirse, alrededor de 200 pares de bases). Esta ajustada predicción, relativa





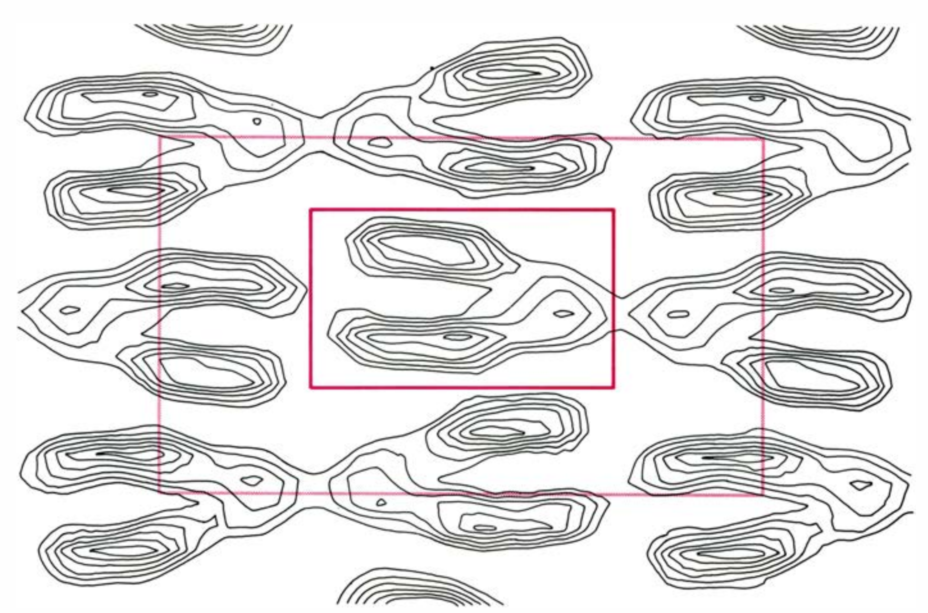
PARTICULAS-NUCLEO del nucleosoma. Resultan homogéneas en tamaño y composición y dan lugar a buenos cristales. En estas micrografías electrónicas, las partículas-núcleo de un cristal fino aparecen aumentadas alrededor de 425.000 diámetros. Se tiñeron negativamente con acetato de uranilo. Una vista terminal de columnas de núcleos nucleosómicos (*izquierda*) muestra su empaquetamiento hexagonal; la distancia de centro a centro (y por consiguiente, el diámetro exterior del núcleo) es de 110 angstrom. Las columnas de núcleos pueden verse lateralmente (*derecha*) en un cristal en formación. Los núcleos aparecen achatados, en forma de disco, a modo de objetos aproximadamente bipartitos de unos 55 angstrom de alto. Se aprecia en ellos una conformación de cuña; de ahí que tiendan a apilarse en arcos y originen columnas ondulantes. (Micrografías de Aaron Klug, uno de los autores.)

al tamaño de los fragmentos, supuso la primera prueba de la hipótesis del collar de cuentas.

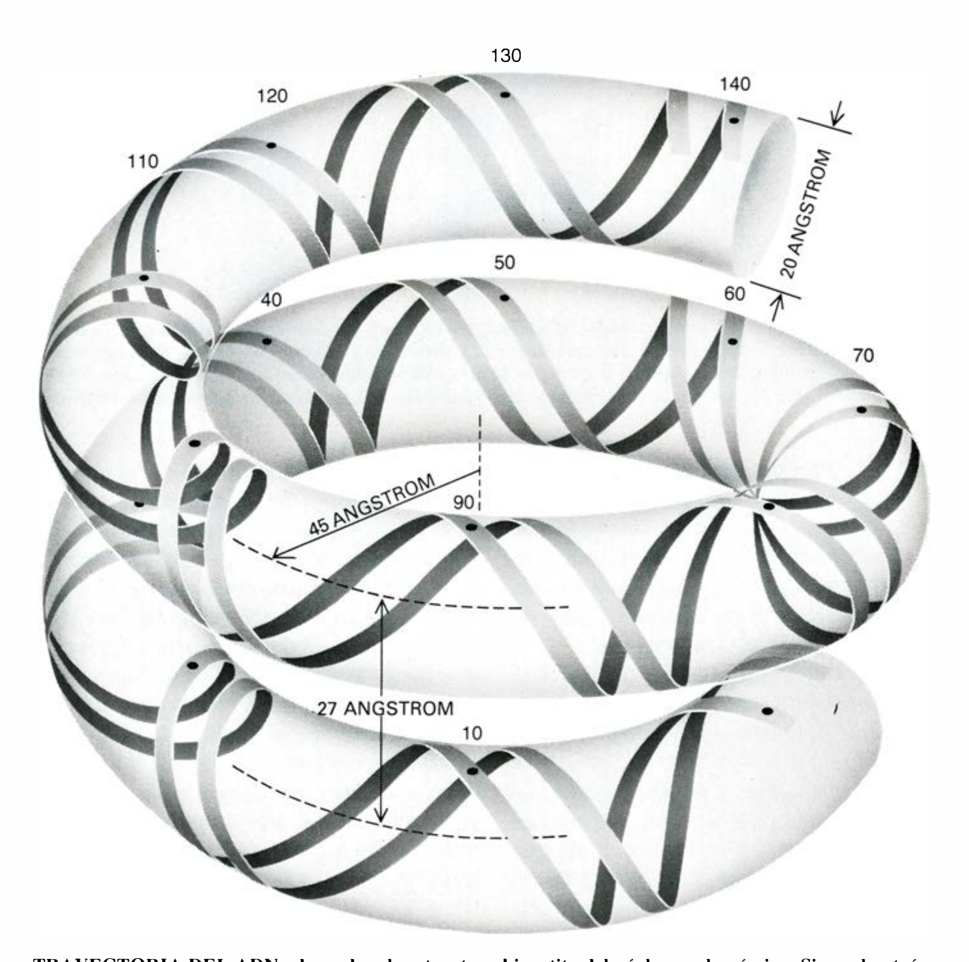
Los resultados no tardaron en producirse. Se disponía ya de una indicación en la bibliografía técnica. Hewish y Burgoyne habían citado en su artículo una distribución similar de fragmentos de ADN, observada en un contexto diferente por Robert Williamson, de la Universidad de Glasgow. Procedimos a releer el trabajo de Williamson y encontramos que los tamaños de los fragmentos de ADN que daba eran múltiplos aproximados de 200 pares de nucleótidos. La concordancia con el tamaño de los fragmentos predicho por la hipótesis del collar de cuentas resultaba notablemente precisa. A partir de ese instante nos pareció que la hipótesis era correcta. Probarlo era ya harina de otro costal.

Los tamaños determinados por Williamson eran sólo aproximados y no estaba clara la relación entre esos fragmentos de ADN y los estudiados por Hewish y Burgoyne. Importaba, pues, repetir los experimentos de Hewish y Burgoyne y medir los tamaños con gran precisión. Decidimos probar un método de medida basado en electroforesis en gel, donde los fragmentos de ADN en cuestión se analizaran conjuntamente con fragmentos indicadores de secuencias nucleotídicas conocidas y, por consiguiente, de tamaño conocido. Marcus Noll, que acababa de incorporarse a nosotros, hizo los análisis. Los valores obtenidos fueron de 205, 405 y 605 pares de nucleótidos para los tres primeros fragmentos, por lo que nuestros temores, en lo concerniente al tamaño de los fragmentos, desaparecieron.

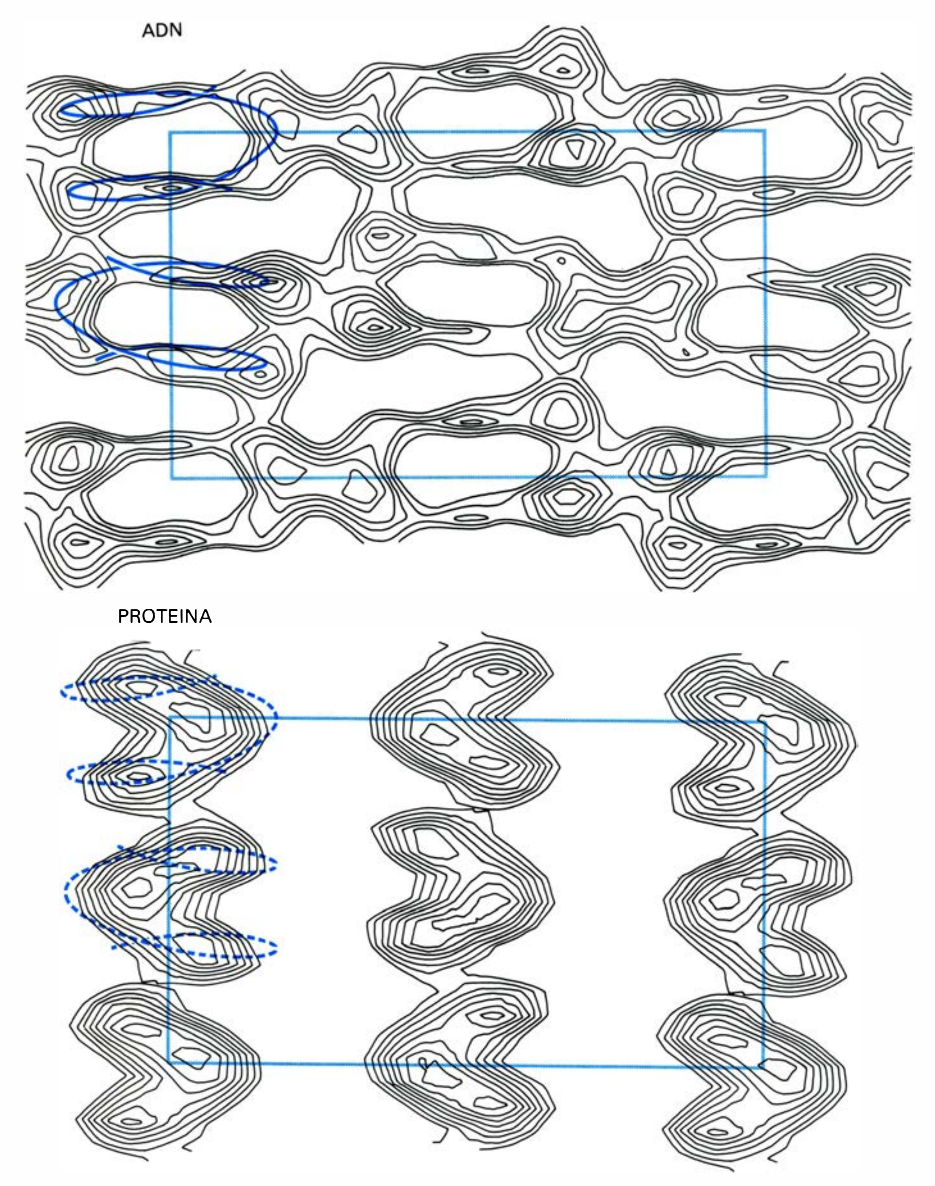
De interés práctico fue un nuevo descubrimiento: la rotura del ADN de la cromatina a intervalos de 200 pares de nucleótidos no constituía una característica singular restringida a la nucleasa de las células hepáticas de rata. La clave de este hallazgo tuvo que ver con el trabajo desarrollado por Gary Felsenfeld, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases, y de Kensal E. van Holde, de la Universidad estatal de Oregón, ocupados a la sazón en el estudio de la digestión de la cromatina con nucleasa micrococal, un enzima purificado a partir de las bacterias llamadas micrococos. En condiciones de digestión generalizada con esta nucleasa, alrededor de la mitad del ADN se degradaba completamente, en tanto que quedaba protegida de la degradación la otra mitad, manteniéndo-



MAPA DE DENSIDAD electrónica de columnas de núcleos vistos lateralmente. Se obtuvo combinando datos de difracción de rayos X y de microscopía electrónica. Lo que se observa es una proyección de la densidad total en la dirección del enfoque. El rectángulo inscrito delimita la célula unitaria, o unidad repetitiva, del cristal. El mapa resuelve elementos con una separación mayor de 20 angstrom. La densidad de cada partícula (rectángulo exterior) aparece distribuida aproximadamente en dos mitades.



TRAYECTORIA DEL ADN adecuada a la estructura bipartita del núcleo nucleosómico. Sigue el patrón de una superhélice cuyo diámetro exterior mide 110 angstrom y una inclinación de 27 angstrom; las vueltas de la hélice de ADN, de 20 angstrom de anchura, se hallan prácticamente en contacto. Existen unos 80 pares de nucleótidos de ADN por giro; la partícula-núcleo, la forma reducida del nucleosoma, que contiene unos 140 pares de nucleótidos, aparece envuelta por un giro y tres cuartos, aproximadamente.



MAPAS DE DIFRACCION de neutrones. Muestran, por separado, la densidad del ADN (*arriba*) y la de la proteína (*abajo*) en un cristal de partícula-núcleo. La densidad del ADN presenta una buena correlación con la proyección de una vuelta y tres cuartos de la superhélice de ADN (*color oscuro*). La superhélice de ADN (*línea discontinua de color*) se dispone bien alrededor de la proteína, el octámero de histonas.

se en fragmentos de 100 a 175 pares de nucleótidos. El material protegido aparecía compacto y particulado, según se desprendía de su velocidad de sedimentación en la centrífuga, superior a la del ADN totalmente desplegado, libre de histonas y de la misma longitud.

Nos preguntábamos si estas partículas se correspondían con nuestras cuentas, por lo que iniciamos la digestión de cromatina con nucleasa micrococal y el subsiguiente análisis de los fragmentos de ADN por electroforesis en gel. Las digestiones suaves nos dieron la misma distribución de bandas, múltiplos de un tamaño unitario de alrededor de 200 pares de nucleótidos, que se había obtenido con la nucleasa de hígado de rata; en condiciones de digestión más generalizada, era virtualmente todo el ADN lo que se fragmentaba hasta el nivel del tamaño unitario (y acababa por degradarse hasta tamaños menores, ya descritos por Felsenfeld y van Holde, como se indicará más adelante). Estos experimentos confirmaron que la fragmentación de la cromatina en regiones espaciadas a intervalos regulares a lo largo del ADN era una propiedad de la estructura de la cromatina, no de una nucleasa en particular. (La disponibilidad comercial de nucleasa micrococal facilitaba grandemente la experimentación, cosa que no ocurría con el enzima de hígado de rata, que debía purificarse en el laboratorio.)

Casi al mismo tiempo tuvimos noticia de una línea de trabajo muy dispar en la que se habían empeñado Ada L. Olins y Donald E. Olins, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, C. L. F. Woodcock, de la Universidad de Massachusetts, Pierre Chambon y sus colegas, del Laboratorio de Genética Molecular de Eucariotas de Estrasburgo, y Jack D. Griffith, de la Universidad de Stanford. Habían mejorado los métodos de preparación de fibras de cromatina para microscopía electrónica, hasta el punto de que podía observarse una subestructura clara y más o menos regular. Las fibras aparecían como disposiciones lineales de partículas esféricas, de unos 100 angstrom de diámetro, conectadas por hebras delgadas de ADN aparentemente libre. Los Olins describieron su hallazgo como "partículas en un hilo". Sus observaciones convirtieron la idea del collar de cuentas en una realidad visible.

Cabía, por supuesto, que las partículas recogidas en las micrografías electrónicas no guardasen relación alguna con la unidad de 200 pares de nucleótidos deducida de los estudios sobre histonas y revelada por la digestión con nucleasas; quedaba todavía por establecer la conexión entre la microscopía electrónica y los ensayos bioquímicos. Conexión que empezó realizando el grupo de Chambon y a la que seguiría la alcanzada en nuestro laboratorio. Digerimos cromatina con nucleasa micrococal durante un intervalo de tiempo adecuado para fragmentar el ADN en algunas regiones, aunque no todas, correspondientes a unidades de 200 pares de nucleótidos; resultó una mezcla de unidades individuales (monómeros), pares de unidades (dímeros) y cadenas de tres (trímeros) y cuatro unidades (tetrámeros). La mezcla, sometida a centrifugación, se fraccionó; los dímeros sedimentan más rápidamente que los monómeros, los trímeros más aprisa que los dímeros, y así sucesivamente.

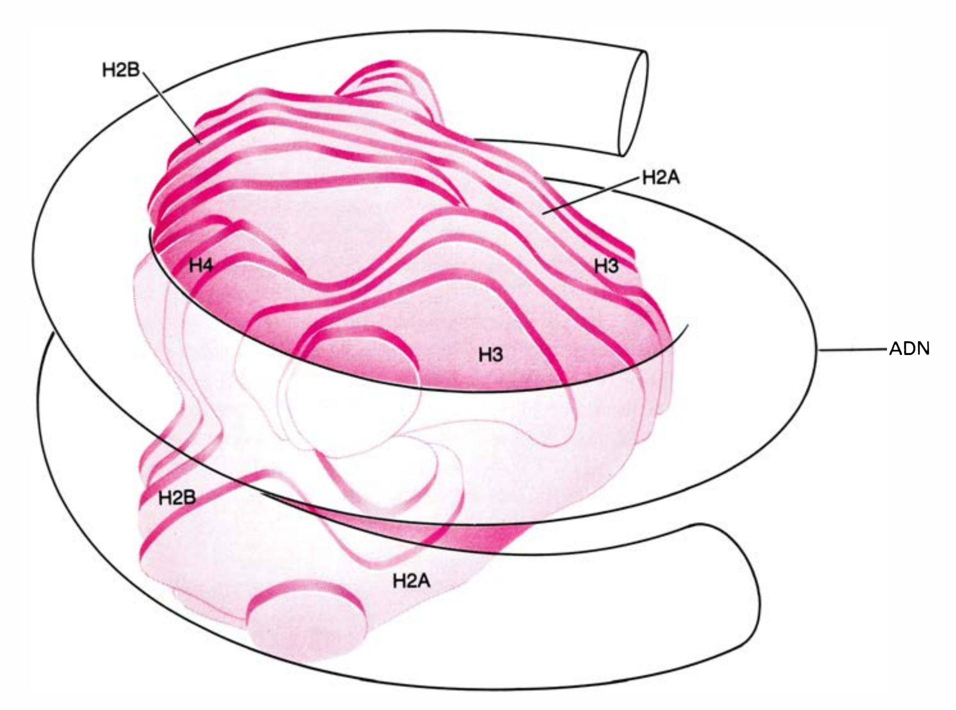
Comprobamos luego la pureza de las fracciones, sometiendo el ADN a electroforesis en gel. Los geles revelaron una sola banda para cada fracción, correspondiendo la del monómero al tamaño unitario de 200 pares de nucleótidos, la del dímero a dos veces el tamaño unidad, y así sucesivamente. Se examinaron esas fracciones al microscopio electrónico: la fracción monomérica mostraba sólo partículas aisladas de 100 angstrom; la fracción de dímeros, pares de partículas, y así progresivamente. Esta perfecta correspondencia estableció la identidad entre las unidades de 200 pares de nucleótidos y las partículas visualizadas en el microscopio. La partícula repetitiva, que pusieron de manifiesto la microscopía electrónica y las digestiones con nucleasa micrococal, ha venido en llamarse nucleosoma.

El último aspecto de la idea del collar de cuentas que carecía de un soporte experimental seguro era el de su relación con las histonas. De nuevo, el entrecruzamiento químico tuvo una participación importante; pero así como antes nos interesaba la asociación entre histonas libres en solución, ahora había que extender los análisis a las histonas en la cromatina. Para ello, debíamos primero conseguir una forma soluble y pura de cromatina. Se logró sometiendo núcleos celulares a digestiones breves con nucleasa micrococal, lo que liberaba fragmentos largos de cromatina esencialmente nativa. El siguiente problema era que las histonas reaccionaban menos con el imidoéster en la cromatina que en estado libre; por consiguiente, el entrecruzamiento resultaba pobre. La dificultad se superó cuando Thomas alteró las condiciones en favor de un incremento de la reaccionabilidad. El éxito fue rotundo: se obtuvieron todos los productos entrecruzados hasta el nivel del octámero de histonas, sin apenas formación más allá de éste. Aún más, el peso molecular del octámero entrecruzado, como era de esperar, se correspondía con el de un agrupamiento de dos moléculas de cada una de las siguientes clases de histonas: H2A, H2B, H3 y H4.

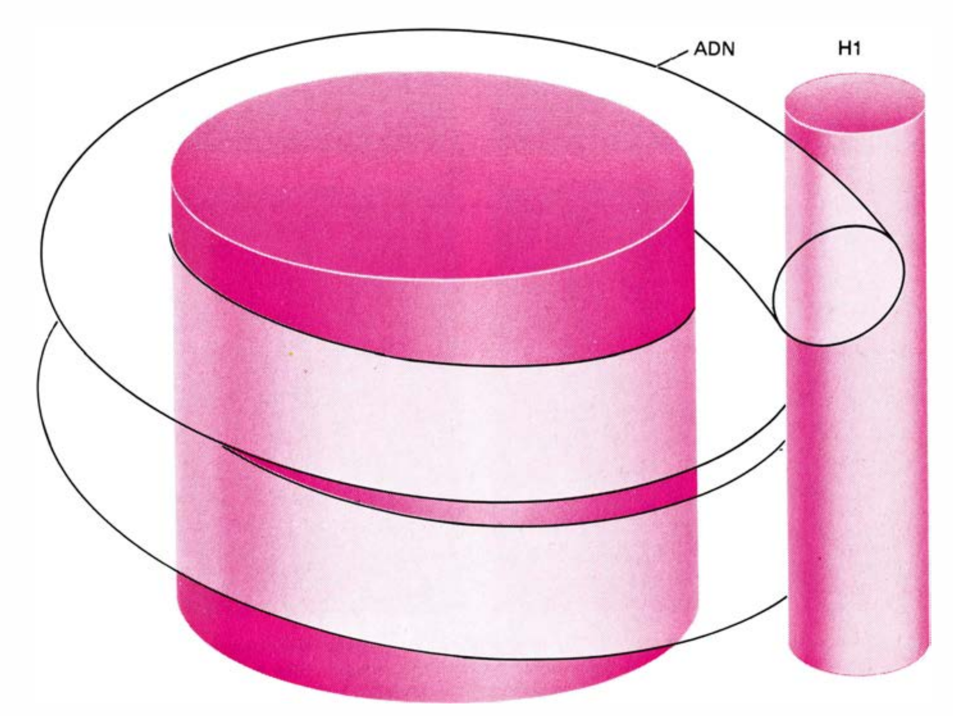
La prueba formal de la existencia de este octámero se obtuvo al aislarlo del ADN, mediante la disociación de los enlaces iónicos formados entre las histonas y el ADN, en disoluciones de elevada concentración salina. El octámero aislado pudo entrecruzarse completamente, lo que daba lugar a una sola banda electroforética; pudo también obtenerse, sin necesidad de entrecruzamiento, por sedimentación en centrífuga. Finalmente, estudios de digestión con nucleasa combinados con los de entrecruzamiento establecieron la asociación del octámero de histonas con la unidad de 200 pares de nucleótidos de ADN.

A pesar de que la hipótesis del collar de cuentas aportaba una solución al problema del complejo ADN-histonas, dejaba planteadas una serie de cuestiones intrigantes. Nos indicaba la existencia de unidades particuladas de 100 angstrom, los nucleosomas, pero dejaba en el aire su forma y estructura. Nos definía cuál era la composición en histonas de la unidad, a saber, un complejo de ocho moléculas de histona, pero no especificaba la disposición espacial de estas moléculas. Por encima de todo, aunque nos revelaba que el ADN se plegaba compactamente, nos ocultaba la manera en que lo hacía. Y allí estaba todavía el misterio en torno a la quinta histona, la H1. ¿Dónde se escondía y cuál era su función?

El plegamiento del ADN era evidente si atendíamos al contraste entre el pequeño diámetro de la partícula, alrededor de 100 angstrom, y la longitud del ADN en ella, unos 700 angstrom. Esto exigía un grado elevado de torsión o de enrollamiento apretado, difícil de reconciliar con la conocida rigidez del ADN. Uno no podía por menos que restar perplejo ante la cuestión de có-



MODELO DE LA PARTICULA-NUCLEO del nucleosoma, construido arrollando un tubo que simulaba la superhélice de ADN sobre un modelo del octámero de histonas, el cual, a su vez, se había deducido de un mapa tridimensional obtenido a partir de micrografías electrónicas del octámero de histonas. Las aristas periféricas del octámero forman un declive helicoidal más o menos continuo sobre el que se sitúa el segmento de ADN de 146 pares de nucleótidos. Las moléculas de histona (cuyos perfiles no quedan definidos a este nivel de resolución) se han colocado a partir de datos de entrecruzamiento químico.



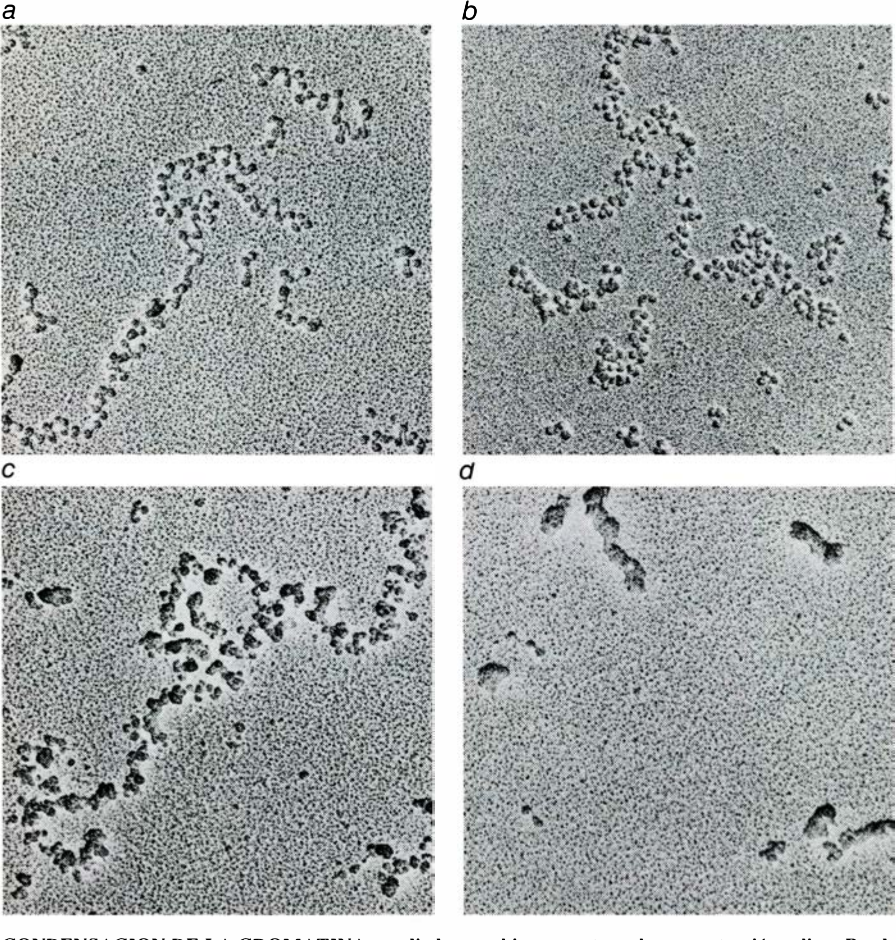
FUNCION DE LA QUINTA HISTONA, H1, según viene sugerida por este modelo del nucleosoma completo. Dos giros totales (166 pares de nucleótidos) de la superhélice de ADN aparecen enrollados en el octámero de histonas, que aquí se ilustra esquemáticamente en forma de tambor. La molécula de H1 (cuya conformación real sigue siendo desconocida) se fija en el lado de la partícula por el que el ADN penetra y sale del nucleosoma. La H1 "precinta" el nucleosoma. (Ilustración de George V. Kelvin.)

mo las histonas inducían este doblamiento. Se avanzaron numerosos e ingeniosos mecanismos; diríase que todos menos el único válido.

Se desplazó el centro de interés: de la identificación del papel desempeñado por las histonas en el plegamiento del ADN a la determinación del trazado seguido por el ADN; de una manera gráfica: pasamos de la bioquímica a la cristalografía de rayos X. Aun cuando no disponíamos de pruebas cristalográficas, había algo que presumíamos: la trayectoria del ADN debía discurrir por fuera de las histonas. La prueba más gráfica de este hecho vino de la digestión de la cromatina, pero esta vez no con nucleasa micrococal sino con ADNasa I de origen pancreático. Este enzima corta rápidamente una hebra de la doble hélice sobre un soporte sólido, en tanto que la nucleasa micrococal lo hace, de modo preferente, entre nucleosomas.

Lo primero que se observó (y la paternidad del hallazgo hay que reconocérsela a Noll en nuestro laboratorio) fue que, a consecuencia de la acción de la ADNasa I, aparecían fragmentos monocatenarios dispuestos en una distribución repetitiva, mucho más precisa que los producidos por la digestión enzimática de la nucleasa micrococal. Las series de bandas electroforéticas correspondían a tamaños de ADN que eran múltiplos integrales de alrededor de 10 nucleótidos. (Más tarde se comprobaría que eran múltiplos de 10,4 nucleótidos.) Simplificando al máximo la interpretación que la observación admite, diríamos que la digestión se restringe, en cada punto, a un sólo lado del ADN (el acercamiento del enzima al otro lado se vería obstaculizado por la presencia de las histonas) y que cada hebra de ADN aparece, en consecuencia, expuesta y protegida alternativamente con la periodicidad de la doble hélice: alrededor de 10 nucleótidos por vuelta. En otras palabras, los resultados de la digestión con ADNasa I pueden explicarse si el ADN se halla en la superficie del nucleosoma, arrollado alrededor de las histonas.

Estas observaciones confirmaron nuestra propuesta inicial (fundada en la noción de que las histonas constituían un complejo globular muy apiñado): las histonas no recubren al ADN, sino que es el ADN el que envuelve a las histonas. De hecho, sería más apropiado decir que la fibra elemental de cromatina equivale a un cordón arrollado sobre cuentas, y no a cuentas atravesadas por un cordón. Los experimentos con difracción de neutrones, llevados a cabo por John F. Pardon, Brian M. Richards y sus colegas, de los Laboratorios de Investigación Searle, aportaron un tipo distinto de pruebas de que el ADN estaba situado en la parte exterior del nucleosoma. Estos resultados fueron confirmados posteriormente por el grupo de E. Morton Bradbury, del Politécnico de Portsmouth. El conjunto de estos trabajos mostró que el ADN se hallaba más alejado del centro del nucleosoma que la proteína.



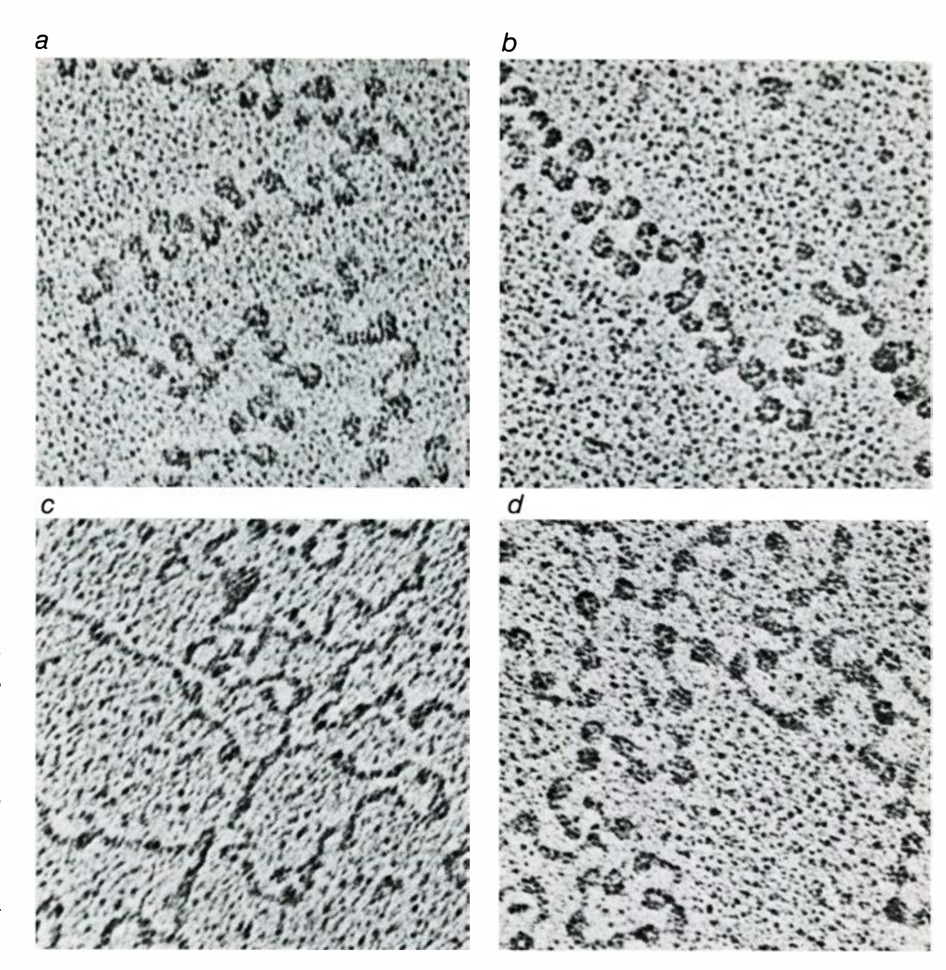
CONDENSACION DE LA CROMATINA, mediada por el incremento en la concentración salina. Puede apreciarse en las micrografías electrónicas tomadas por Fritz Thoma y Theo Koller, del Instituto Federal Suizo de Tecnología. A una concentración salina muy reducida (*a*), la cromatina forma una fibra holgada de unos 100 angstrom de grosor: los nucleosomas aparecen conectados por tramos cortos de ADN. A una concentración de fuerza iónica cercana a la de las condiciones fisiológicas normales (*d*), la cromatina adopta la forma de una fibra gruesa, de unos 250 a 300 angstrom. El origen de este "solenoide" puede deducirse examinando la cromatina a fuerzas iónicas intermedias (*b, c*). Se obtiene a partir de un arrollamiento ligero del filamento nucleosómico. La cromatina se ha aumentado unas 80.000 veces.

Planteamientos tales como la digestion por nucleasas y la difracción de rayos X en disolución revelan, ciertamente, algunas características del nucleosoma, pero la descripción completa de su estructura sólo puede recabarse del análisis cristalográfico, que suministra una información estructural tridimensional. Y así, en el verano de 1975, comenzamos a preparar nucleosomas que pudieran someterse a cristalización.

Debido a que los nucleosomas purificados a partir de los productos de la digestión con nucleasa micrococal no siempre contienen 200 pares exactos de nucleótidos de ADN, su cristalización no es posible. (La heterogeneidad de tamaño síguese del hecho de que la incisión por la nucleasa entre nucleosomas no se limita a una región específica, sino que puede ocurrir a lo largo de un segmento de ADN bastante amplio.) La variabilidad de tamaño puede eliminarse conduciendo el proceso de digestión con nucleasa micrococal más allá de la fase de incisión entre nucleosomas. La digestión generalizada elimina el ADN de los extremos del nucleosoma, dando lugar, de manera coherente, a partículas que poseen una longitud definida de ADN: alrededor de 146 pares de nucleótidos. Esta forma de nucleosoma enzimáticamente reducida se ha venido en llamar partícula-núcleo; el segmento de ADN eliminado

por la digestión prolongada, que inicialmente mantenía unidos un nucleosoma con su adyacente, se conoce como ADN de unión.

Un conjunto de partículas-núcleo no sólo es homogéneo en el tamaño de su ADN, sino también en su composición proteica, ya que cada partícula posee el juego completo de ocho histonas (dos de cada tipo: H2A, H2B, H3 y H4) y ha perdido virtualmente todos los demás componentes de la cromatina, incluida, y esto es particularmente significativo, la quinta histona, H1. Nuestro colega Leonard C. Lutter descubrió cómo producir preparaciones de núcleos de nucleosomas excepcionalmente homogéneos, de los que pudo obtenerse buenos cristales. En nuestro laboratorio, Daniela Rhodes, Ray Brown y Barbara Rushton han preparado, a lo largo de los últimos años, cristales de partículas-núcleo procedentes de siete organismos distintos. Todos los cristales dan diagramas de difracción de rayos X esencialmente idénticos y, por tanto, demostrativos de la universalidad de los nucleosomas. El éxito de esta cristalización prueba que la estructura de la gran mayoría de los nucleosomas es la misma en todo el cromosoma. Imaginar que la mayor parte del ADN de los cromosomas es una estructura repetitiva regular hubiese sido inconcebible hace tan sólo diez años, cuando era creencia muy extendida que la variabilidad a nivel de histonas era responsable de la diversidad estructural cromosómica y de la expresión génica.

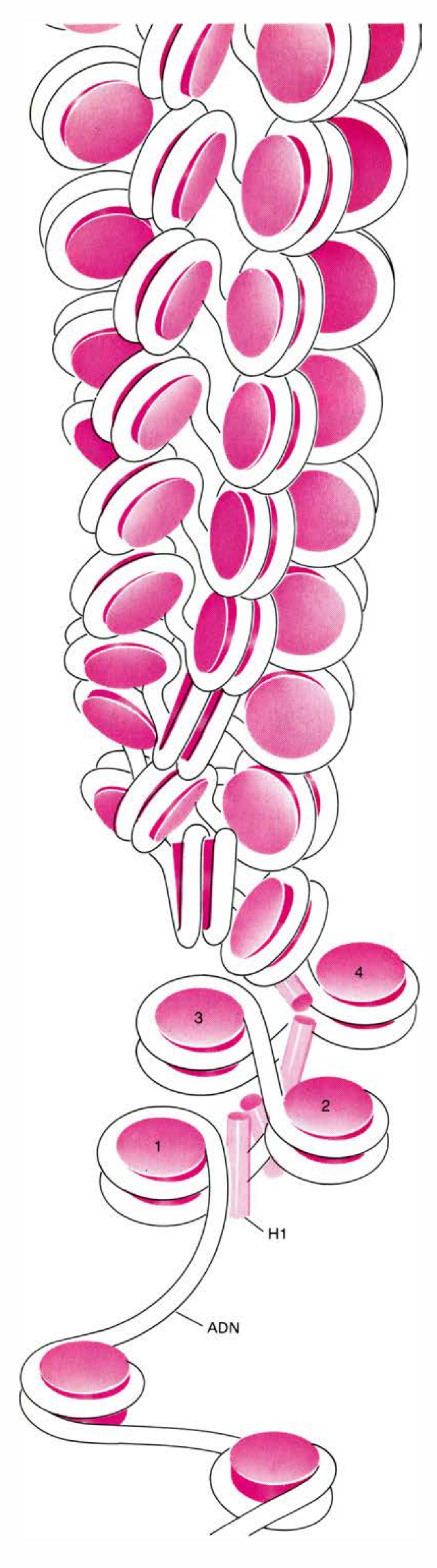


LOCALIZACION DE LA H1 y su participación en la estructura de la cromatina. Una y otra se deducen comparando la geometría que adquieren las fibras con y sin H1 sometidas a fuerzas iónicas intermedias. En presencia de H1, la primera estructura ordenada reconocible a baja concentración salina es un zig-zag poco pronunciado (*a*), debido a que el ADN entra y sale del nucleosoma en sitios próximos entre sí (y porque los nucleosomas tienden a depositarse en la rejilla soporte sobre su cara plana). A una concentración medianamente superior (*b*), el zig-zag es más pronunciado. En ausencia de H1 (*c*, *d*), la cromatina no muestra los anteriores ordenamientos estructurales; en realidad, a baja concentración de sal (*c*) el nucleosoma se abre, dando lugar a una fibra de ADN envuelta en histonas. Estas observaciones sugieren que la H1 se fija en un lado del nucleosoma, estabilizando al ADN. Aumento: unos 200.000 diámetros.

La deducción de una estructura tridimensional a partir de cristales de macromoléculas es un proceso muy laborioso, que puede durar años. De ahí que nosotros nos concentráramos en la obtención de una imagen de las partículas-núcleo de los nucleosomas a baja resolución, mediante combinación de la difracción de rayos X con la microscopía electrónica. Este procedimiento daba una imagen general de la estructura de la partícula, respondiendo así a una importante cuestión: ¿cómo se enrolla el ADN del nucleosoma?

La micrografía electrónica de una cara de un cristal delgado de núcleos de nucleosoma muestra una disposición hexagonal de objetos redondeados, de unos 110 angstrom de diámetro, valor bastante aceptable para el nucleosoma. La imagen resulta del apilamiento de núcleos de nucleosoma formando columnas, cuya anchura, determinada con mayor precisión a partir de mediciones con rayos X, nos da el valor del diámetro exterior de un nucleosoma. La micrografía electrónica de un cristal tomada perpendicularmente a la primera debería darnos una visión lateral de las columnas, pero debido a que las columnas se superponen no se logran distinguir las diferentes columnas ni las partículas-núcleo. Las columnas se detectan mejor en cristales en crecimiento, antes de iniciar su empaquetamiento en capas. Estas imágenes laterales semejan un mazo de placas o discos de una altura aproximada de 55 angstrom. Del aspecto ondulante de los discos se desprende que no son perfectamente planos; en forma de cuña, parecen el sillar de llave de un arco. La configuración geométrica de la partícula-núcleo se acerca más a la de un cilindro achatado, de 110 angstrom de diámetro y 55 angstrom de alto, que a la de una esfera.

Para obtener información más detallada de las micrografías electrónicas es necesario trabajar con los cristales de las partículas-núcleo y aplicar diversas técnicas de elaboración y reconstrucción de imágenes desarrolladas en nuestro laboratorio durante los últimos 15 años. Estos métodos aprovechan la naturaleza repetitiva de los cristales para producir una imagen de las características específicas que se reiteran en todas las partículas. El "ruido de fondo" de las micrografías y las variaciones en el empaquetamiento de los nucleosomas se promedian a partir de la distribución de las partículas. Las distorsiones en la estructura de partículas individuales (provocadas durante la preparación y tinción de las partículas para microscopía electrónica) se eliminan con la ayuda de los datos de difracción de rayos X de los cristales. La información procedente de los rayos X y de la microscopía electrónica se combina entonces para producir un detallado mapa de contorno de la densidad electrónica



en los cristales. Este es el tipo de mapas producido normalmente por los cristalógrafos de rayos X al trabajar con proteínas más pequeñas; nosotros hemos debido añadir la microscopía electrónica para potenciar la calidad de los mapas de estas estructuras, mayores y más complicadas.

Mediante este último procedimiento se obtienen representaciones que muestran tres enfoques específicos, o proyecciones de las densidades electrónicas a lo largo de los tres ejes principales de los cristales. El más ilustrativo de estos mapas corresponde a la imagen perpendicular a una columna en una dirección tal que la superposición de las columnas resulte mínima. La forma en cuña de las partículas-núcleo de nucleosoma se manifiesta con toda claridad; por su parte, la densidad se distribuye en dos mitades aproximadamente simétricas (dato que encajaría coherentemente con un doble eje de simetría cercano al plano de proyección).

La disposición más sencilla de ADN que explicaría esta estructura bipartita se corresponde a la doble hélice de ADN arrollada en una hélice mayor, o superhélice, dando aproximadamente dos vueltas en torno a las histonas situadas en medio de la partícula. Las dos vueltas de la superhélice deben hallarse muy próximas entre sí, pues la hélice de ADN mide unos 20 angstrom de diámetro y, 55 angstrom de altura, la partícula. A partir de la estructura de la doble hélice de ADN y del diámetro de la partícula-núcleo puede calcularse que dos vueltas superhelicoidales completas comprenderían unos 160 pares de nucleótidos. La longitud del ADN de una partícula-núcleo consta sólo de 146 pares, es decir, el equivalente a una vuelta y tres cuartos. Por tratarse de un valor insuficiente para dos vueltas completas, la partícula debe ser más estrecha en un lado, justificando así la forma de cuña.

SUPERESTRUCTURAS HELICOIDALES que podrían formarse con concentraciones salinas crecientes (*de abajo arriba*). La disposición en zig-zag de los nucleosomas (*1*, *2*, *3*, *4*) se contrae formando eventualmente un solenoide, una hélice con unos seis nucleosomas por giro. (La hélice probablemente es más irregular de lo que aparece en el dibujo.) Los datos de entrecruzamiento indican que las moléculas de H1 en nucleosomas contiguos establecen contacto. La extrapolación de la forma de zig-zag a la del solenoide sugiere (aunque no prueba) que la agregación de la H1 a fuerzas iónicas elevadas origina un polímero helicoidal de H1 (*no mostrado*) que se extendería por el centro del solenoide. En ausencia de H1 (*abajo*), no se forman estructuras ordenadas. Los detalles de la asociación de la H1 no se conocen aún. Sólo se pretende indicar que las moléculas de H1 establecen contacto entre sí y con el tramo de ADN de engarce.

La resolución que alcanzan los mapas precedentes es sólo de 22 angstrom; ello vale decir que apenas si se distinguirán los rasgos separados por menos de 22 angstrom. Para lograr una mayor resolución no queda otra vía que servirse de métodos más refinados de "sustitución isomorfa". Nuestro laboratorio está trabajando en esa dirección. Los primeros mapas daban la densidad total del nucleosoma; no podía distinguirse, por separado, la densidad asignable al ADN de la atribuíble a la proteína. Para discernirlas hubo que recurrir a la difracción de neutrones a baja resolución merced a la variación de contraste. Este método se ha utilizado en disoluciones de macromoléculas que poseen dos componentes de distinta densidad, como por ejemplo los virus (que contienen ácido nucleico y proteína) o las membranas celulares (proteína y lípidos). La técnica se funda en la igualación de la densidad del disolvente con la de uno de los dos componentes, de manera que sólo se detecte la dispersión del segundo componente. Este efecto se consigue mezclando, en distintas proporciones, agua corriente y agua pesada (agua cuyo hidrógeno está reemplazado por el isótopo pesado deuterio). Cuando el disolvente posee el 39 por ciento de agua pesada, la dispersión del disolvente y la de la proteína se igualan y, en consecuencia, los neutrones "ven" sólo el ADN; cuando el porcentaje de agua pesada alcanza el 65 por ciento la difracción del ADN se neutraliza por la del disolvente, y la dispersión que se observa se debe sólo a la proteína.

El método de la variación de contraste había sido ya aplicado a las partículas-núcleo del nucleosoma por otros investigadores, según se indicó antes. Pero lo hicieron con partículas en disolución, lo que implicaba que la orientación era aleatoria y sólo podía obtenerse información unidimensional. En nuestros estudios de difracción de neutrones de partículas-núcleo nucleosómicas hemos analizado cristales, y así hemos logrado establecer la relación de proteína a ADN en tres dimensiones. La dispersión de neutrones es débil y requiere cristales individuales grandes. Los cristales se crearon en nuestro laboratorio; más tarde, fueron analizados en el Instituto Laue-Langevin, de Grenoble, por Finch, Graham Bentley, Anita Lewit y otros. Obtuvieron mapas separados de proyección de ADN y de proteína. El mapa de ADN confirma la conclusión inicial relativa al trayecto del ADN, deducido de las micrografías

electrónicas y del análisis de rayos X. El mapa proteico muestra que el propio octámero de histonas posee forma de cuña, como cabía esperar si las histonas constituyesen una pequeña plataforma helicoidal a la que se uniese el ADN.

Existe otra alternativa para distinguir, mediante la difracción de neutrones, qué parte corresponde al ADN y cuál a la proteína; el proceso en cuestión consiste en eliminar el ADN y estudiar directamente el octámero de histonas. El octámero puede aislarse y mantenerse estable en concentraciones salinas elevadas, como se ha descrito antes. Se ha intentado cristalizar el octámero aislado a fin de proceder a una determinación estructural completa. Aunque estos esfuerzos han resultado hasta ahora infructuosos, durante la experimentación se han obtenido fibras muy regulares. Procedimos al estudio de estos agregados ordenados en el microscopio electrónico y procesamos las imágenes, tal como se expuso antes para los cristales de partículas-núcleo. Habida cuenta de la peculiar geometría de los agregados, cada imagen contiene enfoques del octámero desde direcciones muy distintas. Estas tomas se combinaron mediante un método, introducido en 1968 por David J. DeRosier y uno de nosotros (Klug), en el que se deduce una representación tridimensional a partir de la proyección de un conjunto de imágenes bidimensionales.

La estructura tridimensional del octámero engloba lo observado en las distintas proyecciones de la partícula-núcleo del nucleosoma obtenidas de las difracciones de rayos X y de neutrones, particularmente en su forma de cuña y su carácter bipartito. La conformación muestra que es el octámero de histonas lo que fuerza al ADN a seguir el trayecto superhelicoidal que descubríamos más arriba. En definitiva, es el octámero el que determina la arquitectura del nucleosoma.

La resolución de la representación del octámero es demasiado reducida para definir las distintas moléculas de histona; con todo, hemos aprovechado la relación entre el octámero y la superhélice de ADN para interpretar el mapa en términos de histonas individuales. Esta interpretación recoge los resultados del entrecruzamiento histona-histona y los estudios de entrecruzamiento químico efectuados por Andrei D. Mirzabekov y sus colegas, del Instituto de Biología Molecular de Moscú. Los investigadores rusos procedieron a localizar las regiones específicas de la superhélice de ADN que interaccionaban con cada uno de los cuatro tipos de histonas. Resiguiendo el trayecto del ADN en nuestro modelo de nucleosoma, asignamos estos lugares a regiones concretas del mapa del octámero, elaborando así una disposición tridimensional de las ocho moléculas de histonas.

A partir de la disposición espacial, puede deducirse la participación individual de las histonas en el plegamiento del ADN sobre el nucleosoma. El tetrámero $(H3)_2$ $(H4)_2$ define el giro central de la superhélice de ADN. Las H2A y H2B se añaden en calidad de dos dímeros (H2A) (H2B), uno a cada lado del tetrámero, y cada uno de ellos enlazado a un ADN adicional, lo que completa la superhélice. Esta estructura explica por qué muchos investigadores observan que las H3 y H4, por sí solas, pueden, en ausencia de H2A y H2B, conferir al ADN características de nucleosoma, mientras que las H2A y H2B no lo consiguen por sí mismas.

Esta serie de razonamientos ha dado una visión aceptablemente detallada de la estructura del nucleosoma, pero no ha proporcionado ninguna indicación de la relación que media entre un nucleosoma y su contiguo en la cadena nucleosómica, es decir, la fibra básica de cromatina. Para deducir la relación entre nucleosomas consecutivos será necesario considerar de nuevo la digestión de cromatina por la nucleasa micrococal. Como se expuso antes, cuando la digestión con nucleasa micrococal va más allá del punto de rotura entre nucleosomas, se degrada ADN adicional y los nucleosomas se convierten en partículas-núcleo. Al examinar minuciosamente esta conversión, observamos que se producía una pausa en una fase intermedia, en la que la longitud del ADN equivalía a 166 pares de nucleótidos. En el proceso degradativo desde esta fase intermedia hasta la final, de partículas-núcleo de 146 pares de nucleótidos, se produce el desprendimiento de la H1. Puesto que la partícula núcleo consta de dos mitades simétricas, es razonable pensar que la conversión desde 166 pares de nucleótidos hasta 146 ocurre por eliminación de 10 pares de cada extremo del ADN nucleosómico. Esta circunstancia sugiere que la H1 se halla asociada a los extremos. Además, la partícula de 166 pares de nucleótidos contiene dos vueltas superhelicoidales completas de ADN, hecho que fuerza a los dos extremos a acercarse al máximo, permitiendo que una molécula de H1 se una, a la vez, a ambos extremos del ADN del nucleosoma de doble giro. Razón por la que dedujimos que la H1 debía colocarse lateralmente en el nucleosoma en la región de entrada y salida de la superhélice de ADN.

No cabe duda de que la histona H1 constituye una proteína accesoria, en el sentido de que se localiza en el exterior del nucleosoma y no es esencial para el enrollamiento del ADN en la partícula-núcleo. La función de la H1 tiene que ver con la condensación adicional de la fibra de cromatina. Se suponía desde hace algún tiempo que la H1 se hallaba de alguna manera implicada en la condensación de la cromatina, pero se ignoraba a qué nivel podría desempeñar tal misión. Hans Ris, de la Universidad de Wisconsin, había demostrado que las fibras observadas en estudios por microscopía electrónica de cromosonas intactos poseían un diámetro, bien de unos 100 angstrom, o bien de unos 300 angstrom, dependiendo de la presencia en las preparaciones de agentes quelantes (secuestrantes de iones metálicos). La fibra de 300 angstrom había recibido diversas interpretaciones: según unas, se trataba de una sola fibra de 100 angstrom enrollada, según otras, eran dos fibras de 100 angstrom agrupadas de forma holgada.

Para resolver esta ambigüedad preparamos unas condiciones experimentales donde las dos clases de fibras podían interconvertirse. Así, pudo comprobarse, en micrografías electrónicas de fibras de 100 angstrom que experimentaban la conversión, que éstas se arrollaban sobre sí mismas formando una hélice de 300 angstrom de anchura, con cinco o seis nucleosomas por vuelta y donde los giros sucesivos tendían a acercarse, de forma que la distancia de centro a centro venía a ser de unos 100 angstrom. A esta estructura de 300 angstrom le dimos el nombre de solenoide. (Experimentos paralelos de rayos X sugirieron que el elemento responsable de la característica reflexión de rayos X de 100 angstrom era el espaciado entre vueltas del solenoide y no la distancia de centro a centro entre nucleosomas a lo largo de la fibra de cromatina.) También demostramos que la H1 condicionaba el plegamiento de la fibra de 100 angstrom para formar el solenoide de 300 angstrom: cuando se reproducían los experimentos con cromatina exenta de H1 no se formaban estructuras ordenadas que mostraran una trayectoria definida de la fibra. En su lugar, se obtenían solamente agrupaciones condensadas irregulares de nucleosomas. El solenoide, aunque orde-

nado, quizá no ostente una configuración regular absoluta, probablemente porque sufre algún plegamiento o enrollamiento cuando la cromatina se condensa más todavía.

Fritz Thoma y Theo Koller, del Instituto Federal de Tecnología de Suiza, realizaron experimentos similares, aunque más refinados. Consiguieron mostrar que la fibra simple de 100 angstrom –un filamento de nucleosomas dispuestos lineal y holgadamente– se observa sólo a fuerzas iónicas muy bajas, cuando la cromatina se halla en su forma más extendida. A medida que aumenta la fuerza iónica, la fibra evoluciona desde el filamento nucleosómico holgado hasta una estructura en zig-zag y, con el tiempo, hasta el solenoide. Estos experimentos nos condujeron a formular una propuesta específica relativa a cómo la molécula de H1 condiciona el arrollamiento del filamento de 100 angstrom en una fibra de 300 angstrom.

La configuración en zig-zag de la forma intermedia se debe a que el ADN entra y sale del nucleosoma en regiones cercanas del mismo lado del nucleosoma. Ahí es donde se fija la H1; en las formas intermedias en zig-zag, las regiones de fijación de la H1 de los nucleosomas adyacentes parecen hallarse muy próximas, si no en contacto. Al aumentar la fuerza iónica, las regiones de la H1 formarían un polímero helicoidal, originando un solenoide. Ha quedado revelada la existencia de polímeros de H1 a través de experimentos de entrecruzamiento químico; con todo, está por demostrar que posean realmente el efecto postulado. Lo que importa es que la agregación de la H1 acompaña, y puede controlar, la formación del solenoide.

Con esta hipótesis sobre la formación de la fibra de 300 angstrom hemos llegado hasta donde nos lo han permitido los hechos incontrovertibles. Para valorar el alcance del conocimiento actual de la condensación del ADN en los cromosomas podemos recurrir a la medida cuantitativa de la relación de empaquetamiento: la relación entre la longitud del ADN en el estado de extensión total y su longitud en el estado de arrollamiento o plegado propio de cada fase de condensación. La formación del nucleosoma de doble vuelta, por ejemplo, comprime 166 pares de nucleótidos de ADN con una longitud de unos 600 angstrom en un arrollamiento de 55 angstrom de altura, dando así una relación de empaquetamiento que se cifra en torno a 10. El arrollamiento posterior de esta cadena en hélice, para constituir la fibra soleneiforme de 300 angstrom, incrementa la relación de empaquetamiento por un factor de alrededor de cinco, de donde resulta una relación global de empaquetamiento que se halla en torno a 50. Hay que comparar este valor con la relación de empaquetamiento de alrededor de 5000 –100 veces superior– que se observa en los cromosomas más condensados durante la división celular. Ni que decir tiene que pueden elaborarse modelos que impliquen nuevos enrollamientos o rizos de la fibra de 300 angstrom para adecuarla a estas condiciones extremas de condensación. Hasta ahora, sin embargo, no se dispone aún de información precisa que privilegie cualquiera de las alternativas posibles.

Hemos visto cómo las histonas –esas abundantes y ubicuas proteínas del núcleo– constituyen la médula de la subunidad elemental de la estructura del cromosoma. A ellas se debe que el problema de la condensación del ADN, planteado en unos términos insolubles de empaquetamiento de un cable rígido (la propia molécula del ácido nucleico), se exponga en términos más aceptables: arrollamiento del cable a una canilla y agrupamiento posterior de canillas bobinadas igualmente por ADN.

Las histonas no ejercen un influjo directo en la expresión de la información genética, aunque sí pueden favorecer los cambios de la estructura cromosómica para una expresión selectiva, cuando los genes de los cromosomas adquieren un estado de actividad. Transformación esta de la que conocemos muy poco. A pesar de ello, acaba de determinarse que la cromatina activa mantiene todavía histonas enlazadas; y lo que quizá sorprenda más: se conserva la periodicidad repetitiva nucleosómica. Indicaciones suministradas por distintos laboratorios apoyan la idea de que la cromatina activa contiene, además de las histonas, ciertas proteínas no-histonas, que, de alguna manera, modificarían la estructura del nucleosoma, dándole una forma más abierta o relajada. Una prueba positiva en este sentido es que la cromatina activa es más sensible a nucleasas del tipo ADNasa I. Pero esto ya es arena de otro capítulo de la historia.

Llegados aquí, nuestra situación es la del espectador teatral instalado en un patio de butacas a obscuras, que ha asistido al primer acto y se ha enterado de qué va la trama entre los dos protagonistas: el ADN y las histonas. Pero el reparto no ha acabado y nadie sabe exactamente cuál será el desenlace de la obra.

Ciencia y sociedad

Hortofruticultura

Uno de los objetivos que persigue la agricultura española es el de satisfacer la demanda de productos agrarios de la sociedad procurando mantener el equilibrio en la balanza de pagos del comercio exterior agrario. Alcanzar este objetivo no resulta fácil, como nos lo demuestra la realidad cotidiana. En España hemos pasado de una balanza del comercio exterior agrario con un saldo positivo de unos 100-200 millones de dólares en 1961-1965 a un saldo negativo de 1000 millones de dólares en 1974-1978. Ello ha sido la consecuencia lógica del aumento de la renta per cápita de la población, que ha motivado un cambio estructural de la dieta media, cuyo rasgo más característico ha sido el aumento del consumo de productos de origen animal y una reducción del consumo de alimentos vegetales. Satisfacer las necesidades de proteínas motivadas por el cambio del hábito alimentario que ha experimentado la sociedad española en las dos últimas décadas exige un aumento de la producción agraria equivalente al 50 por ciento, aumento que, al no haberse alcanzado en el interior, ha obligado a aumentar las importaciones de productos agrarios, que han provocado el desequilibrio negativo en la balanza de pagos.

Resulta paradójico que un país que tiene unos 20 millones de hectáreas cultivables y, de ellas, 2.700.000 de regadío como es el nuestro, posea una balanza comercial agraria deficitaria. Para reducir este déficit se impone, por un lado, aumentar las producciones de maíz y de soja al objeto de disminuir los volúmenes que se importan y, por otro, aumentar las exportaciones. Para alcanzar estos objetivos se precisa, en primer lugar, corregir las deficiencias inherentes a toda agricultura tradicional como es la española y, después, tratar de aumentar los rendimientos unitarios mediante la introducción de nuevas técnicas de cultivo y haciendo un uso más racional de los fertilizantes, fitosanitarios y tecnologías disponibles.

De acuerdo con la evolución de otros países, parece evidente que el desarrollo agrario del nuestro sólo podrá alcanzarse a través de una profunda transformación de las tecnologías de la producción agraria. Ello exige realizar los trabajos necesarios para poner en marcha las tecnologías más avanzadas, disponer de una estructura de extensión agraria con capacidad para acercar esas tecnologías a los agricultores y aumentar considerablemente el capital que se destina al desarrollo de la producción y comercialización agraria de acuerdo con las nuevas tecnologías.

Desde la década de los sesenta se están realizando en España esfuerzos por conseguir una ordenación sistemática y eficaz de la investigación y de los servicios de extensión agraria, así como del mecanismo de interconexión entre ambos. Todo ello es básico para trazar una política agraria eficiente.

Con objeto de contribuir a esta política, los autores (P. Cuñat, del Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos de Valencia, A. Aguilar, de la Estación Experimental "La Mayora" de Caleta de Vélez, y V. García, del Centro de Edafología de Tenerife) tratan aquí de apuntar algunas ideas sobre las necesidades de investigación. Para ello, toman como base de partida la situación actual de la producción agrícola de exportación española; en colaboración posterior se ocuparán de los problemas prioritarios para concluir apuntando las acciones, actividades o estudios que deberían emprenderse.

La precocidad de algunas producciones agrícolas derivadas de la situación meridional de la península ibérica y de las islas Canarias ha motivado nuestra especialización en el cultivo de frutas y hortalizas para la exportación. En estas áreas se ha dado prioridad a las producciones de exportación.

Cuando se examinan los datos relativos a las horas de insolación eficaz que inciden en España y se comparan con los otros países europeos se aprecia, en términos generales, una situación de privilegio, pues la mayor parte del país goza de unas 2500-3000 horas de sol por año. La temperatura media anual de la zona mediterránea, donde se halla ubicada la mayor parte de la producción agrícola de exportación, oscila entre los 15 y 19 grados centígrados; la suavidad de los inviernos permite el cultivo de hortalizas al aire libre o, en todo caso, bajo una protección ligera contra los vientos fríos. Algunas zonas del área mediterránea, sur y este de la península, así como las islas Canarias, están prácticamente exentas de heladas.

Junto a estas condiciones de insolación eficaz y temperaturas suaves, francamente favorables para una producción agrícola de exportación, se dan otras, como son: escasa pluviometría y humedad y excesiva evaporación, que han de corregirse para evitar sus perniciosos efectos sobre los cultivos. La pluviometría de la zona del mediterráneo español es escasa, inferior a 400 milímetros anuales y, además, irregular y estacional (primavera y otoño). Esta escasez, estacionalidad e irregularidad hacen necesario que la producción agrícola se lleve a cabo en regadío. Las humedades relativas medias oscilan entre el 35 por ciento, que puede darse en algunas zonas de Andalucía en pleno verano, y el 75-80 por ciento en otras del litoral levantino. En general, la evaporación media anual del área mediterránea es mayor que la precipitación. Según los índices de Thornthwite, este área es de clima semiárido y en algunas partes árido. Afortunadamente, toda la región posee buenas reservas de aguas subterráneas; los habitantes han sabido adaptarse al medio y, perforando el suelo, han aprendido a proveerse del agua necesaria para el regadío.

El mercado español de frutas y hortalizas está en plena expansión desde el año 1960, aproximadamente. Pero las corrientes comerciales existentes en este mercado entre España y los otros países europeos tienen, prácticamente, un solo sentido cuyo origen está en España. Como una parte considerable de las exportaciones agrícolas españolas se dirigen a los países del Mercado Común, se prevé que la entrada de España en la Comunidad Económica Europea ha de repercutir favorablemente

AÑO	CARNE	LECHE	TRIGO
1964	25,5	63,5	92,7
1977	65,3	97,3	75,1

Evolución del consumo de productos animales y vegetales en España durante el período 1964-1977 (kilogramos per cápita y año)

para la producción hortofrutícola de nuestro país. La integración de España en Europa ha de contribuir a equilibrar la balanza comercial agraria. Mas, para ello, es necesario disminuir los costes de producción de los principales cultivos de exportación, lo cual requiere a su vez que mejoremos nuestra tecnología agrícola.

El cultivo de los cítricos en nuestro país es de una gran importancia económica. España es el primer productor de cítricos de la cuenca del mediterráneo y el tercer productor mundial. Si se analiza la evolución de las exportaciones de cítricos españoles, se ve que durante el período 1930-1955 España proporcionaba el 63 por ciento de los frutos consumidos en Europa; en cambio, durante el período 1955-1972 este porcentaje representó solamente el 40 por ciento, a pesar de que el consumo de frutos cítricos en Europa mantuvo una tendencia a la alza. La competencia de los otros países exportadores del mediterráneo aumentó notablemente; y así, en los períodos citados, la exportación desde Marruecos pasó del 3,4 por ciento al 16,3 por ciento del consumo europeo y la de Israel pasó del 12,7 por ciento al 16,9 por ciento, en los mismos períodos. Por fortuna, desde 1972 la participación española en el consumo europeo de frutos cítricos se mantiene prácticamente constante. En la actualidad, frente a un consumo estabilizado de unas 3.000.000 toneladas métricas, España mantiene su posición; seguimos siendo el primer país exportador de frutos cítricos con unas 1.500.000 toneladas, aproximadamente. Ante la estabilización del consumo y la creciente competencia de otros países, en España debemos esforzarnos por producir frutas de mejor calidad, que satisfagan las exigencias del consumidor, para mantener nuestra posición en Europa.

El cultivo de los cítricos en España ocupa una extensión aproximada de 200.000 hectáreas. La producción anual oscila alrededor de las 2.800.000 toneladas, de las cuales 1.900.000 corresponden a naranjas, 650.000 a mandarinas, 200.000 a limones y unas 10.000 a pomelos. De esta producción se destinan unas 2.500.000 toneladas a la comercialización en fresco, de las cuales se exportan 1.500.000-1.600.000 toneladas; unas 750.000-850.000 se reservan para el consumo interior. La producción restante se destina a la industrialización en forma de zumos y conservas. El valor estimado de las exportaciones de cítricos españolas se cifra en unos 50.000 millones de pesetas.

PRODUCTO	HECTAREAS		VALOR EXPORTACIONES	
	1976	1977	1976	1977
Tomate cosechado entre: 1 enero y 31 mayo, 1 junio y 30 septiembre, 1 octubre y 31 diciembre	13,1 46,5 8,6	12,4 48,2 12,5	4766 (total)	4880 (total)
Patata extratemprana (15 enero-15 abril) Patata temprana (15 abril-15 junio)	9,3 55,6	10,5 52,4	1818 (total)	3274 (total)
Melones y sandías	99,0	88,3	1205	1168
Cebolla	34,3	39,5	1166	1604
Pepino	5,1	5,2	853	905
Judías verdes	24,3	23,8	464	638
Alcachofa	21,5	24,5	444	554
Lechuga y escarola	23,6	23,9	270	268
Calabaza y calabacín	4,7	5,2	245	465
Pimiento	29,7	28,8	178	360
Berenjena	4,2	4,5	161	239

Superficie cultivada (en miles de hectáreas) y valor de las exportaciones (en millones de pesetas) de diferentes hortalizas, según datos del Anuario Estadístico de la Producción Agraria del Ministerio de Agricultura

En lo concerniente a las hortalizas de exportación, las regiones españolas ribereñas del Mediterráneo junto con las islas Baleares y Canarias constituyen la zona productora más precoz de Europa. El valor de las exportaciones de hortalizas es de unos 12-13.000 millones de pesetas. En la ilustración superior se relacionan, por orden de importancia decreciente, las principales hortalizas exportables, que representan en conjunto el 95 por ciento, aproximadamente, de las exportaciones. Las cinco primeras (tomate, patata, melón-sandía, cebolla y pepino) suponen alrededor del 80 por ciento. Les siguen en importancia las judías verdes y las alcachofas y, después, lechuga y calabacín con unos 500 millones de pesetas; a partes prácticamente iguales y a gran

PRODUCTO	SUPERFICIE CULTIVADA		VALOR EXPORTACIONES	
	1976	1977	1976	1977
Uva de mesa y pasas	83,4	85,8	3375	2467
Almendra	450	461	3926	4696
Avellana	32	34	393	893
Albaricoque	21,6	20,2	196	128
Melocotón	47,9	45,9	343	237
Ciruela	10,7	11,4	338	187
Manzana	67,6	62,6	62	625
Pera	38,8	34,0	296	344
Aguacate	0,6	0,6	5,3	13
Chirimoya	0,8	0,85	2,2	2,5

Superficie cultivada (en miles de hectáreas) y valor de las exportaciones (en millones de pesetas) de diferentes frutas, según el Anuario Estadístico de la Producción Agraria del Ministerio de Agricultura. En 1979 la superficie destinada al cultivo de aguacate fue de unas 2000 hectáreas

distancia del grupo primero, los pimientos y berenjenas. El cultivo de pimientos y berenjenas está adquiriendo importancia digna de consideración en Canarias, desde donde salen, aproximadamente, el 40 por ciento del total de las exportaciones españolas. Somos el primer productor de melón del mundo con unas 700.000 toneladas anuales. El 90 por ciento de los pepinos exportados procede de Canarias.

La superficie dedicada al cultivo de la mayoría de las especies consideradas se mantiene prácticamente constante; sólo el tomate, judías verdes y alcachofas muestran una tendencia creciente año tras año. Conviene señalar que el 40 por ciento del tomate de invierno se exporta desde Canarias. La superficie dedicada al cultivo de esta especie en España aumenta a un ritmo medio anual de 1500 hectáreas, estimulado, principalmente, por el aumento de las exportaciones. Durante los últimos diez años, la superficie dedicada al cultivo de judías verdes ha aumentado a un ritmo de unas 700-800 hectáreas por año, si bien, durante los tres últimos años, la superficie cultivada se mantiene constante; la de alcachofas crece a un ritmo de 1000 hectáreas por año; el aumento de la superficie de cultivo de estas dos especies se debe, sobre todo, al incremento del producto industrializado, que también se dedica en un alto porcentaje a la exportación.

La exportación de alcachofas en nuestro país se ve favorecida por la precocidad con la que se presenta en el mercado. Se exporta desde noviembre hasta abril; la producción española en esta época concurre al mercado sin competencia, pues la producción francesa empieza en mayo, que es cuando finaliza el ciclo anual de esta especie en España.

El valor de las exportaciones de frutos no cítricos asciende a unos 10.000-11.000 millones de pesetas. Las frutas exportables más importantes pueden agruparse en: uva de mesa y pasas, frutos secos, frutas de hueso, frutas de pepita y frutas tropicales. El valor de las exportaciones de las frutas pertenecientes a los grupos citados representa el 90-95 por ciento del valor total de las exportaciones de frutas no cítricas.

El grupo más importante es el de los frutos secos; entre éstos, el almendro es, con mucha diferencia, la especie que participa en mayor proporción en tales exportaciones. La superficie dedicada al cultivo del almendro crece con cierta irregularidad año tras año; durante los diez últimos, se ha duplicado su superficie de cultivo. España es el primer país productor de almendra, seguido en importancia por Estados Unidos, Italia, Grecia y Turquía. Dentro del grupo de los frutos secos, el avellano es otro a destacar por el valor de la producción exportable; las exportaciones de avellana crecen con bastante regularidad y durante el año 1977 alcanzaron los 900 millones de pesetas; el cultivo de esta especie está también en expansión, creciendo a un ritmo medio anual de casi 1000 hectáreas.

A los frutos secos les sigue en importancia la uva de mesa y pasas con una producción exportable que representa unos 2500-3500 millones de pesetas. La superficie destinada al cultivo de esta especie está prácticamente estabilizada, o en ligera regresión.

A gran distancia del valor de las exportaciones de frutos secos o uva de mesa se halla el de las frutas de hueso y de pepita que, en conjunto, representan unos 1500 millones de pesetas con una variación anual muy fuerte, función de las producciones de los países del Mercado Común. La superficie destinada al cultivo de frutales de hueso y de pepita en el país está en franca regresión y se prevé una reducción importante de las superficies cultivadas.

Las frutas tropicales exportables, excepción hecha del plátano que compite en desventaja con la producción de las otras regiones productoras dada la carestía de su cultivo en Canarias, están representadas por el aguacate y el chirimoyo; hasta la fecha, no han tenido una incidencia importante en las exportaciones agrícolas debido, sin duda, al escaso volumen producido; sin embargo, se prevé un fuerte incremento en el futuro inmediato, dado el fuerte ritmo con el que los agricultores de Andalucía oriental y Canarias están realizando nuevas plantaciones (unas 1000 hectáreas anuales de las dos especies), estimulados por la buena acogida de estos frutos en los países del Mercado Común. Las exportaciones de aguacate desde Canarias pasaron de unas 30 toneladas en 1975-76 a 250 toneladas en 1978, lo que representa un incremento superior al 700 por ciento.

Por último: flores y plantas vivas. La superficie dedicada a la floricultura en España se eleva a unas 2500 hectáreas, unas 900 de las cuales se cultivan bajo protección (invernaderos o abrigos de plástico). Al cultivo de claveles se destinan unas 930 y 530 hectáreas al de rosas; las 1000 restantes se reparten entre el cultivo de plantas vivas y flores distintas de claveles y rosas. La floricultura constituye uno de los sectores más jóvenes y prometedores de nuestra producción hortofrutícola de exportación; durante los diez últimos años la superficie de cultivo de flores y plantas vivas se ha multiplicado, aproximadamente, por tres, aumento que no tiene parangón en ningún sector agrícola de España, y aún estamos muy lejos de alcanzar las cotas de producción de países como Francia, Italia, Bélgica, Holanda, Israel y otros.

El valor de las exportaciones de flores y plantas vivas ascendió en 1977 a 1550 millones de pesetas, siendo el capítulo de plantas vivas el más importante con 780 millones de pesetas; le siguen a gran distancia las rosas, con 310 millones, y los claveles, con 220 millones de pesetas; los 240 millones de pesetas restantes exportados se reparten entre otras flores y hojas y ramas ornamentales. (P. Cuñat, A. Aguilar y V. García.)

El videotex

La teleinformática progresa a pasos agigantados. La utilización de los computadores en cualquier lugar donde se desarrolle la actividad humana es recurso que nos acompañará durante los proximos años, como un feliz resultado del maridaje entre las técnicas de procesado de la información y de las de comunicación de datos. El avance de la técnica y el desarrollo de la tecnología facilitan la creación de un consumo masivo que, merced al aumento de la producción, ocasiona un abaratamiento de los costes, lo que a su vez incide sobre las primeras completando la espiral. Si este principio es válido en la mayoría de las actividades económicas, lo es doblemente en el campo de la electrónica en general y en el de la informática en particular. Vaya, pues, por delante el hecho de que también la teleinformática avanza por la gran rentabilidad de sus productos. Alguien afirmaba con ironía no hace mucho que, además de un excelente área de inversión, la teleinformática constituye una interesante herramienta para mejorar la calidad de la vida. Nada más cierto a nuestro juicio.

El videotex es la primera manifestación doméstica de la teleinformática, esto es, el primer servicio pensado para acceder desde el hogar, mediante un terminal y a través de un medio público de comunicación, hasta una información almacenada en un computador remoto. Explicaremos brevemente algu-

nos aspectos técnicos de los elementos que conforman un servicio videotex. Nos referiremos en primer lugar a las características generales de un sistema teleinformático para completarlas, a continuación, con las específicas de un sistema videotex.

La utilización de un computador desde un lugar remoto implica, al menos, el empleo de tres tipos de elementos: el computador, al cual se desea acceder, un elemento terminal que facilite el acceso, y, por último, un medio de comunicación que permita alcanzar a los dos tipos de sistemas mencionados.

Por lo que se refiere al computador, poco tenemos que decir aquí; sólo recordar que deberá estar dotado tanto del soporte físico como del soporte lógico necesarios para realizar sus operaciones. Las funciones básicas de este computador consistirán, por una parte, en el tratamiento de la información que le corresponda y, por otra, en la gestión del diálogo con los distintos terminales que le estén asociados.

Habitualmente, el acceso a un computador se realiza a través de un terminal que suele estar provisto de un teclado, similar al de una máquina de

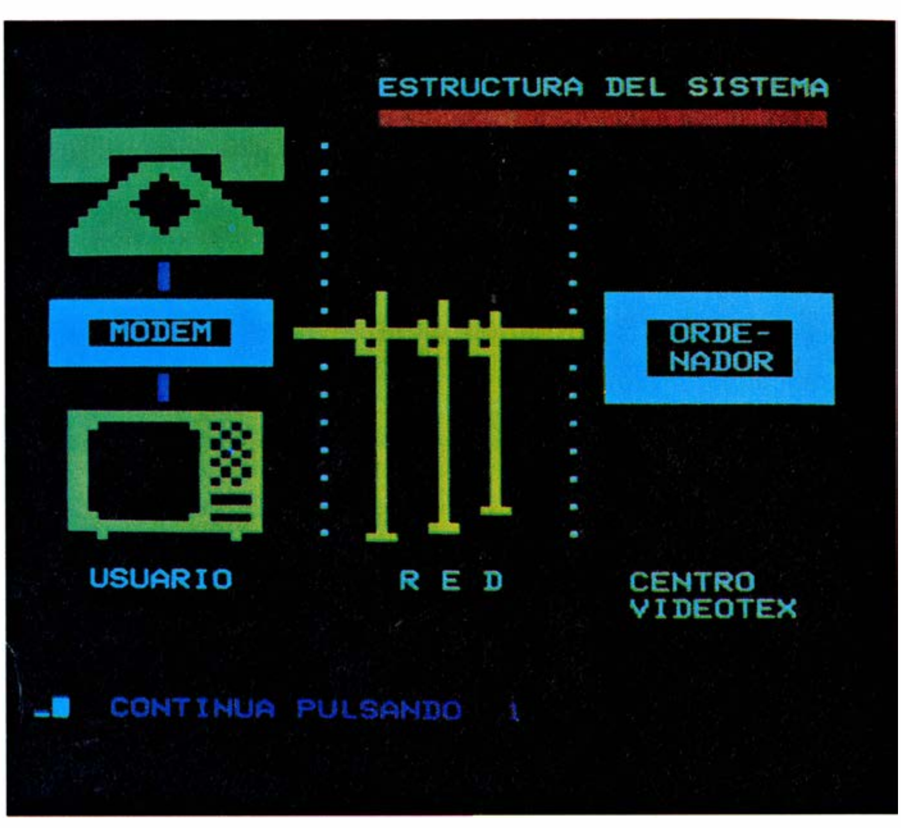


Imagen videotex tomada de la pantalla del televisor que representa, precisamente, la estructura del sistema

escribir, y de una unidad de presentación de la información, ya sea una impresora ya sea una unidad electrónica de visualización, generalmente un tubo de rayos catódicos (una pantalla). A este tipo de terminal se le suele llamar alfanumérico, debido a que la información que maneja consta fundamentalmente de letras, números y un conjunto de otros símbolos ortográficos. Todos ellos reciben la denominación genérica de caracteres; éstos se manipulan en forma binaria según un determinado código o alfabeto.

La comunicación entre un terminal y un computador se funda básicamente en la transmisión, entre dichos elementos, de los códigos correspondientes a los caracteres que constituyen las informaciones que desean intercambiar. Si dicha comunicación se realiza a través de una línea telefónica, cuyas características, como es natural, han sido previstas para la transmisión de la voz en la banda de frecuencias de 300 a 3200 hertz, será necesario proceder a una adaptación para que se puedan transmitir a través de ella informaciones binarias.

Dicha adaptación consistirá, en el origen, en una operación de modulación apropiada, con objeto de transformar la señal digital en otra analógica capaz de transmitir por la línea; en el destino se precisará realizar la operación contraria, denominada demodulación, a fin de recuperar nuevamente la información digital. Se conoce por modem el equipo que realiza dichas operaciones, modulación y demodulación.

Partiendo, pues, de las características generales de un sistema teleinformático, estamos en condiciones de comentar aquellas que son específicas de un sistema videotex. Como veremos, éstas serán consecuentes con los objetivos que se pretende cumpla el nuevo servicio teleinformático.

Dado que el videotex está orientado hacia el gran público, debe ser ante todo: sencillo de manejar, atractivo en lo que se refiere al acceso a la información y económico en su coste para un gran número de posibles usuarios. El servicio videotex permite el acceso a información de uso e interés general, ya sea suministrada por organismos públicos o por promotores privados, y, en general, pretende proporcionar cualquier servicio que pueda ser facilitado por un computador como, por ejemplo, la transmisión de mensajes entre usuarios, el acceso a medios de cálculo, etcétera.

Al igual que en cualquier otro sistema teleinformático, en un servicio videotex intervendrán también: un computador al que se desea acceder, un terminal que facilite el acceso y un medio de comunicación que materializa el enlace. El computador contendrá la información a la que es posible acceder, es decir, la base de datos; además, deberá realizar las operaciones de atención a los terminales, así como las de tarificación y facturación de los servicios prestados a los usuarios.

En los terminales es donde van a influir más las características a las que hemos hecho alusión antes. Como unidad de presentación de la información se utiliza un receptor de televisión, el televisor en color doméstico, que permitirá presentar la información de forma atractiva en uno de los ocho tonos que es posible obtener combinando los tres colores fundamentales de la pantalla: rojo, azul y verde. El teclado para la realización de las consultas, de simple y fácil manejo, puede acercarse al tipo

que figura en los modernos teléfonos de teclas y que contienen los números del 0 al 9 y los símbolos # y *; doce símbolos en total a través de los cuales se desarrollará el diálogo del usuario con el sistema para acceder y seleccionar la información deseada. El teclado puede tener una forma similar a la de un mando a distancia de cualquier televisor.

Para la adaptación a la línea telefónica será necesario utilizar un equipo formado por un modem, que permita además compartir la línea con el teléfono y utilizarla indistintamente para uno u otro tipo de comunicación, aunque en cada caso de forma exclusiva.

Por lo que se refiere a la presentación de las informaciones sobre la pantalla existen distintas soluciones. Aquí vamos a ocuparnos de la que quizá se use en el sistema videotex español, que coincide a grandes rasgos con la empleada en el sistema prestel, desarrollado y en servicio actualmente en Gran Bretaña. Recordemos que se trata de representar en la pantalla del televisor textos y figuras. La solución utilizada, conocida por sistema de presentación alfamosaico, parte de la división de la pantalla en una matriz de celdas, de 40 columnas por 24 filas, lo que da un total de 960 elementos; en cada uno de ellos podremos representar un símbolo alfanumérico o un símbolo gráfico, o bien una parte de ellos.

En la adopción de un sistema videotex, surge el problema de la elección del conjunto de símbolos que se desea que puedan representarse en la pantalla del aparato.

En el caso de España, el alfabeto debe ser el necesario para permitir escribir correctamente en cada una de las cuatro lenguas del estado: castellano, catalán, vascuence y gallego, utilizando letras mayúsculas y minúsculas. Por lo que se refiere a los símbolos gráficos, el conjunto seleccionado debe permitir la composición de dibujos que resulten agradables al usuario. En un sistema videotex típico, el número total de símbolos tanto alfanuméricos como gráficos que pueden llegar a representarse oscila en torno a los 300, que podrán aparecer en diferentes formas y colores combinados con distintos fondos.

La comunicación entre el computador y el terminal consistirá en la transmisión de las informaciones necesarias para componer con la ordenación deseada las 960 celdas que forman cada pantalla. Para configurar cada celda, habrá que transmitir el código del símbolo que se desea representar en ella, su forma, color, fondo, etcétera; todo ello convenientemente codificado. El control de las funciones de decodificación de estas informaciones, la presentación en la pantalla, y la atención al teclado del usuario corresponderá a un equipo electrónico controlado por un microcomputador [véase "Microcomputadores", por Antonio Alabau y Joan Figueras; INVESTIGACION Y CIENCIA, septiembre de 1977; páginas 92-101], que deberá añadirse a los circuitos que actualmente existen en un receptor de televisión.

Cierto es, pues, que la teleinformática progresa a pasos de gigante, que el videotex es su primera manifestación doméstica y que la evolución no se detendrá aquí. Alguien lo dijo: "en la mayoría de las casas existe un televisor, en muchas hay también un teléfono, hacedlos trabajar conjuntamente y habréis creado la base de un poderoso servicio". (Antonio Alabau, Universidad Politécnica de Barcelona.)

Enfermedades por autoinmunidad

Alteraciones del sistema inmunitario en las que el organismo ataca a sus tejidos originan enfermedades cuya causa se desconocía. La identificación de los mecanismos involucrados proporcionará nuevos métodos terapéuticos

Noel R. Rose

A lo largo de su vida, todos los individuos están expuestos a distintos microorganismos potencialmente dañinos. Esos gérmenes invasores son mantenidos a raya por el sistema defensivo inmunitario del organismo, que intercepta y destruye las células extrañas. Constituye un hecho de extraordinaria importancia médica y biológica el conocimiento de las alteraciones del sistema que causan las enfermedades por autoinmunidad. Tales procesos se originan cuando el sistema inmunitario, que ordinariamente distingue lo propio de lo extraño con gran precisión, empieza a atacar a alguno de sus propios tejidos.

El sistema inmunitario debió evolucionar a partir de la necesidad de reconocimiento intercelular de los primitivos organismos multicelulares. La comunicación entre células resultaba esencial para el desarrollo de órganos especializados. En tales mecanismos de reconocimiento se desarrolló la capacidad de discriminar lo propio de lo extraño, tarea que recayó en el sistema inmunitario, hoy presente en todos los animales vertebrados. A lo largo de la evolución, el sistema adquirió una función igualmente importante: la de eliminar las células extrañas que invaden el organismo.

La capacidad de distinguir lo propio de lo extraño no implica únicamente a los microorganismos y parásitos invasores, sino también a moléculas extrañas que pueden no tener efectos nocivos. Así, por ejemplo, el organismo puede rechazar proteínas alimenticias si tales moléculas proceden de una fuente extraña y no son hidrolizadas por los enzimas del tracto digestivo. Cuando las proteínas se hidrolizan y absorben por la pared intestinal en forma de aminoácidos (los constituyentes primarios de las proteínas), éstos pueden volver a utilizarse para la síntesis de nuevas proteínas, que serán ya propias del organismo.

El sistema inmunitario rechaza también las células de cualquier otro organismo de la misma especie, salvo que aquellas sean idénticas a las propias. Cuando se trata, por ejemplo, de glóbulos rojos, células relativamente simples, resulta sencillo hallar sangre de un donante que sea compatible con la del receptor, y así realizar transfusiones con un riesgo mínimo. Es más difícil la compatibilidad entre células dotadas de núcleo (del que carecen los glóbulos rojos humanos), razón por la cual el trasplante de un riñón exige, a diferencia de la transfusión sanguínea, el tratamiento con drogas inmunosupresoras.

Los seres humanos, y otros animales, pagan un alto precio por la protección de su individualidad biológica. Así, el mecanismo responsable del bloqueo de las respuestas inmunológicas frente a los propios tejidos permite a veces que las células cancerosas escapen a la destrucción. Las diferencias entre células normales y cancerosas son a veces tan sutiles que el sistema inmunitario no acierta a detectarlas. Con todo, se cree que el sistema inmunitario ataca a las células malignas que presentan características muy diferentes de las típicas de las células normales.

Las dos principales funciones del sistema inmunitario pueden resumirse de la forma siguiente: (1) rechazo de células y sustancias extrañas potencialmente nocivas y (2) búsqueda de células cancerosas que ocasionalmente puedan desarrollarse. Ambas funciones requieren un mecanismo específico de identificación de lo propio y lo extraño. Alteraciones de tal sistema de identificación determinan la aparición de reacciones de ataque inmunitario frente a las propias células y tejidos. Tales respuestas son objeto de un intenso estudio por parte de médicos y biólogos.

El descubrimiento de la autoinmunidad

El primer investigador que valoró la importancia de la discriminación entre lo propio y lo extraño fue el microbiólogo alemán Paul Ehrlich. En 1900, interesándose por el destino de la sangre vertida en una hemorragia interna, inició una serie de experimentos en los que inyectaba sangre en la cavidad abdominal de las cabras. Si se les inyectaba sangre procedente de otras especies, de carnero por ejemplo, aparecían en el suero nuevos factores, capaces de lisar, es decir, destruir, los glóbulos rojos extraños. Esos factores eran proteínas específicas denominadas anticuerpos. Los anticuerpos se encuentran también en la sangre de los seres humanos y otros animales después de una infección causada por microorganismos patógenos. Las sustancias extrañas que inducen la formación de anticuerpos se denominan antígenos.

Ehrlich observó, con cierta sorpresa, que la sangre de cabra inyectada en animales de la misma especie resultaba también antigénica. Los anticuerpos inducidos por la sangre podían lisar los glóbulos rojos de la cabra donante y de la mayoría de otras cabras, aunque no de todas. Sin embargo, los anticuerpos no producían la lisis de los glóbulos rojos de la cabra receptora.

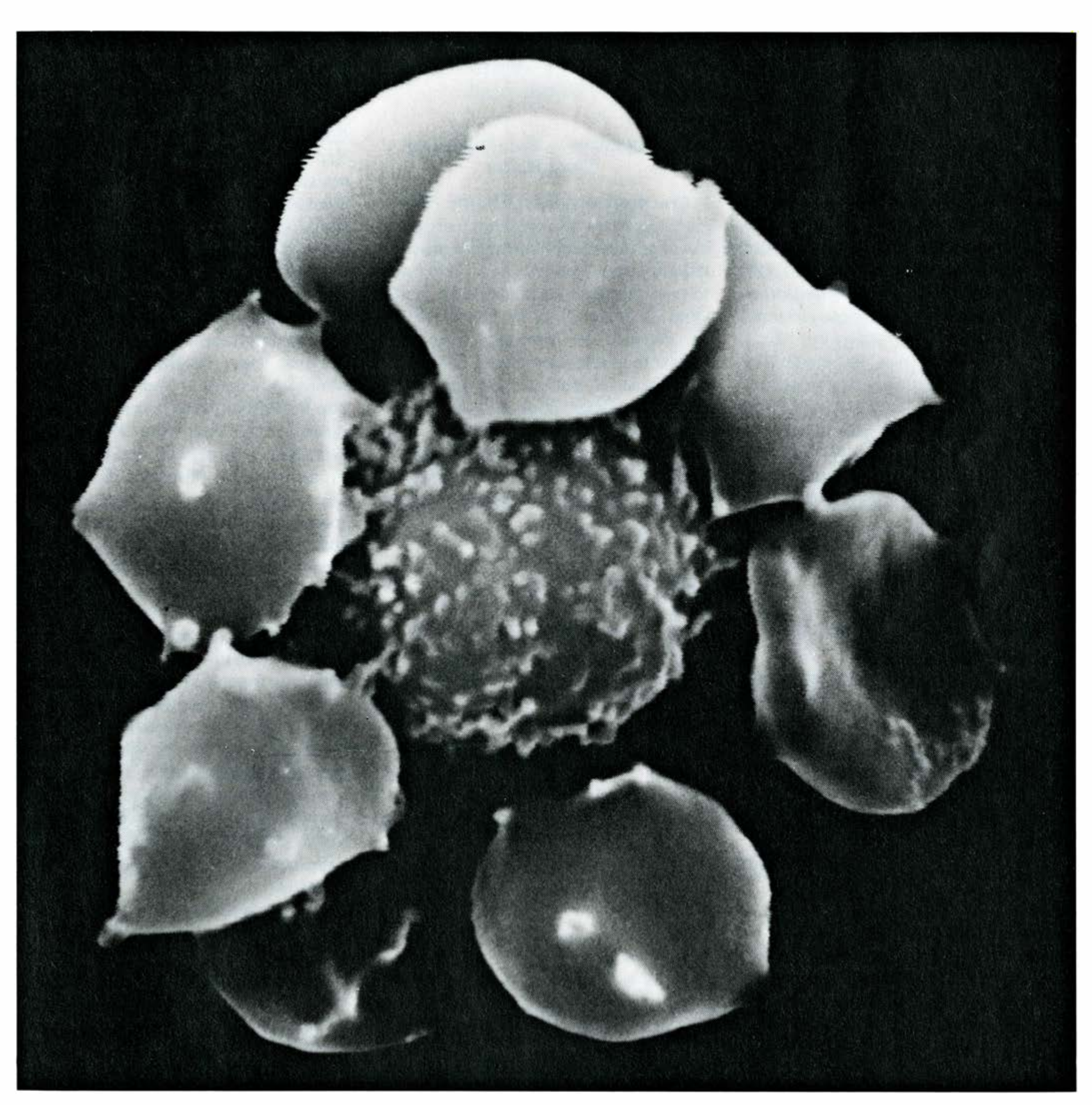
Ehrlich denominó "isoanticuerpo" a los anticuerpos sintetizados por un individuo que actúan frente a células de otros individuos de la misma especie. Los antígenos responsables de la formación de isoanticuerpos se denominan isoantígenos. Se trata de grupos químicos presentes en algunos individuos de la misma especie, aunque no en todos. Un animal que carezca de un determinado isoantígeno desarrollará anticuerpos cuando se le inyecte tal isoantígeno.

Un hecho fascinó a Ehrlich: que una cabra nunca produjera anticuerpos frente a sus propios glóbulos rojos, ni siquiera cuando estas células se extraían y se reinyectaban en ella. Bautizó a este fenómeno como *horror autotoxicus*. Pretendía expresar así el principio biológico de que un animal no

reacciona, generalmente, frente a grupos químicos de su propio organismo, es decir, no produce autoanticuerpos, anticuerpos frente a antígenos propios o autoantígenos. Ehrlich dedujo que, de ocurrir lo contrario, los anticuerpos resultantes dañarían los tejidos propios, causando enfermedades por autoinmunidad.

Sabemos ya que la autoinmunidad constituye la causa primaria o secundaria de muchas enfermedades de etiología anteriormente desconocida. En 1904, Karl Landsteiner, contemporáneo de Ehrlich, describió el primer caso conocido de enfermedad humana desencadenada por autoanticuerpos. Los pacientes que sufrían una enfermedad relativamente rara, la hemoglobinuria paroxística producida por el frío, presentaban en el suero un autoanticuerpo que se combinaba con los propios glóbulos rojos del paciente, aunque únicamente a bajas temperaturas, tales como las del clima invernal. Cuando el tejido recupera la temperatura normal del organismo, el anticuerpo unido a los glóbulos rojos determina la destrucción de estas células. El fenómeno puede demostrarse fácilmente: se le pide al paciente que sumerja el dedo en agua helada durante breves momentos y lo retire para recuperar su temperatura normal. La lisis de los glóbulos rojos se pone de manifiesto por el color rosado del plasma obtenido por punción del dedo.

Algunas de las formas más comunes de anemia humana resultaron también



LINFOCITO HUMANO, una de las células principales implicadas en la defensa inmunitaria. El linfocito reconoce los antígenos invasores mediante receptores especiales de su membrana. En esta micrografía de barrido, un linfocito *T* aparece rodeado de varios glóbulos rojos obtenidos de sangre de carnero. Los dos tipos de linfocitos existentes en la sangre, *T* y *B*, muestran el mismo aspecto al microscopio electrónico. Por alguna razón desconocida, los linfocitos *T* poseen receptores a los que se unen los glóbulos rojos de carnero. Los receptores determinan la adherencia de los glóbulos rojos a la superficie del linfocito. Con el microscopio óptico, los agregados tienen el aspecto de una roseta. Las rosetas constituyen un método generalizado para contar linfocitos *T*. La micrografía es de C. Lynn Burek, de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Wayne, y, su ampliación, de unos 5000 diámetros.

estar asociadas con la presencia de autoanticuerpos frente a los glóbulos rojos. Los anticuerpos se combinan con los hematíes a la temperatura corporal y determinan su destrucción. La demostración de anticuerpos en el suero de pacientes contra sus propios glóbulos rojos es uno de los elementos claves para el diagnóstico de la anemia hemolítica por autoinmunidad.

En muchas otras enfermedades humanas, la presencia de autoanticuerpos en el suero indica la importancia de la autoinmunidad en la génesis de tales procesos. Por ejemplo, en las formas más graves de diabetes mellitus, particularmente en la infantil, se detectan autoanticuerpos contra los islotes pancreáticos. Las células productoras de insulina localizadas en los islotes serían las víctimas del ataque de los autoanticuerpos.

Los pacientes que sufren de miastenia gravis, una afección en la que los músculos no obedecen a los impulsos nerviosos, presentan en el suero anticuerpos frente a las uniones neuromusculares. Un efecto resultante es la aparición de debilidad muscular. En la enfermedad de Graves, alteración de la glándula tiroides que cursa con producción excesiva de hormonas tiroideas, se detectan anticuerpos que reaccionan con las células tiroideas. En lugar de dañarlas, los anticuerpos estimulan su actividad productora de hormona. El exceso de producción provoca síntomas como intranquilidad, pérdida de peso y palpitaciones.

Quizás el compendio de las enfermedades por autoinmunidad en los seres humanos sea el lupus eritematoso sistémico. En esta enfermedad, el paciente produce un sinnúmero de autoanticuerpos frente a diferentes componentes del organismo. Algunos de ellos están dirigidos contra el ADN del núcleo celular y pueden combinarse con el ADN liberado en la corriente sanguínea. Los agregados antígeno-anticuerpo suelen quedar retenidos en los glomérulos renales, que regulan el sistema de filtración de los riñones, alterando considerablemente la función renal.

Componentes de la respuesta inmunitaria

Con posterioridad a Ehrlich, muchos investigadores se sintieron sorprendidos ante la validez general del principio del *horror autotoxicus,* pero todo intento por descubrir su mecanismo resultó vano. A finales de la década de 1950, F. M. Burnet, de Australia, propuso la teoría de la selección clonal para la formación de los anticuerpos. Esta teoría asume la existencia de un gran número de células precursoras, cada una de las cuales poseería un receptor proteico específico en su superficie. Cuando un antígeno invasor o inyectado experimentalmente topa con la célula precursora que porta el receptor complementario en su superficie, se une a ella y desencadena una serie de divisiones celulares. Esta proliferación exponencial da lugar a un clon de células que segregan el anticuerpo detectado en la sangre. Los anticuerpos son proteínas específicas programadas genéticamente para interaccionar con los antígenos que han estimulado su producción.

James L. Gowans, de la Universidad de Oxford, mostró por primera vez que la célula clave en la respuesta inmunitaria era el linfocito, una pequeña célula redondeada de la sangre, bazo y ganglios linfáticos, capaz de reconocer antígenos mediante receptores específicos de su superficie. Al igual que otras células sanguíneas, los linfocitos proceden de células precursoras pluripotentes de la médula ósea. Una de las poblaciones de linfocitos madura bajo la influencia del timo; consecuentemente, estas células se han denominado células *T,* o derivadas del timo. Otra población de linfocitos, las células *B,* proceden de un precursor de la médula ósea y maduran sin estar sometidas a la influencia del timo. Hay, por último, células originadas en la médula ósea que colaboran con los linfocitos en la respuesta inmunitaria. Entre ellas cabe citar a los macrófagos, que captan antígenos y los presentan a los linfocitos de forma tal que pueda iniciarse adecuadamente la respuesta inmunitaria. Los macrófagos son también células fagocitarias (basureros) que engloban y digieren los microorganismos invasores y otras partículas antigénicas.

Los linfocitos muestran varias propiedades que los capacitan para llevar a cabo sus funciones inmunológicas. Algunos de ellos circulan repetidamente por el organismo, ejerciendo una eficaz vigilancia frente a los invasores extraños. Algunos linfocitos, de larga vida, guardan durante años la memoria de un contacto previo con un antígeno. Un nuevo contacto con el mismo antígeno desencadena una respuesta más rápida e intensa.

La característica más importante del linfocito maduro es el receptor de su membrana, que le permite reconocer un determinado antígeno. De acuerdo con la teoría de la selección clonal, cada linfocito responde únicamente a un antígeno, pues presenta un solo tipo de receptor. La correspondencia entre el receptor del linfocito y el antígeno indica que la respuesta inmunitaria es específica para un determinado antígeno.

Todos estamos expuestos diariamente a una gran cantidad de antígenos en

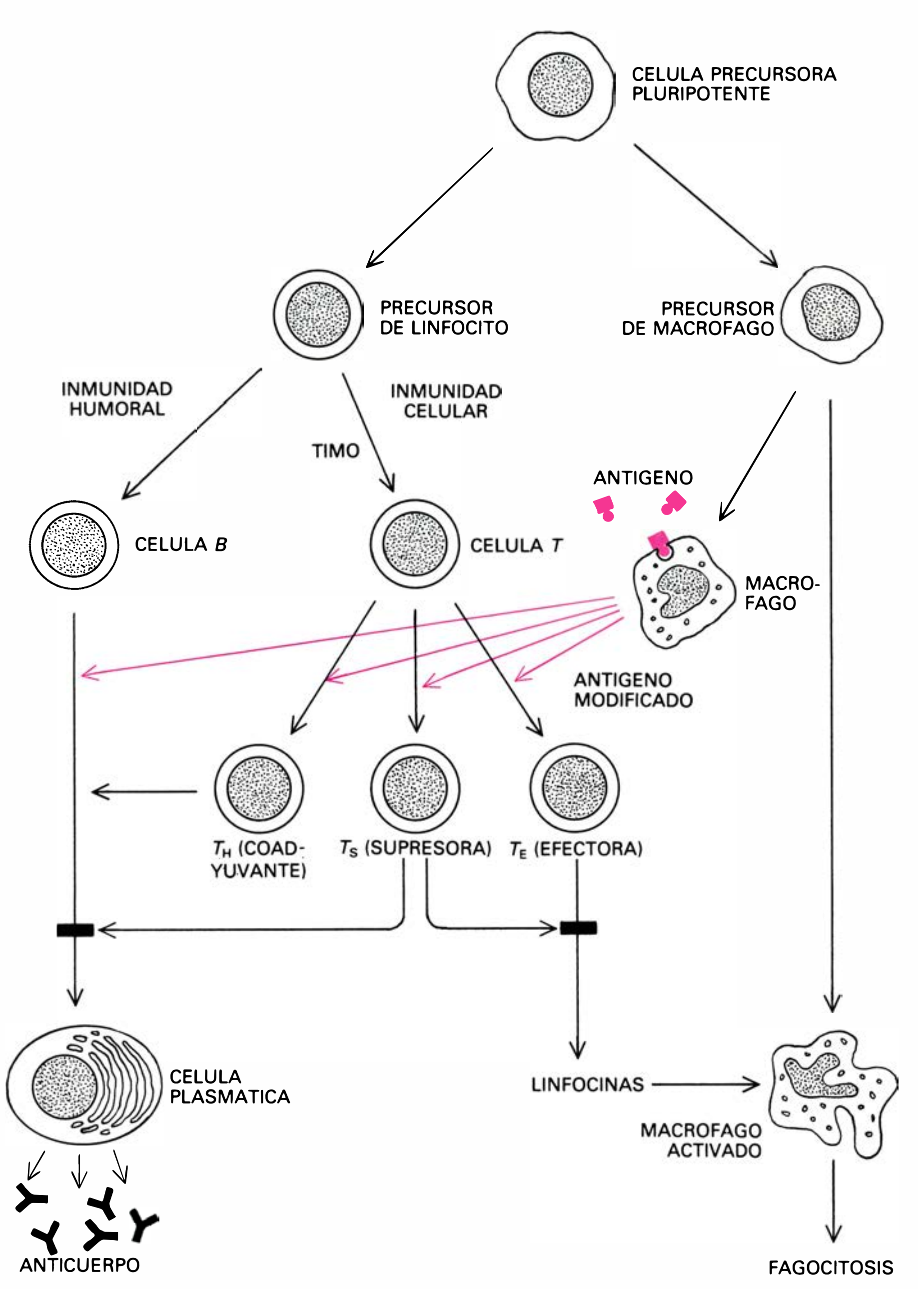
EXPERIMENTOS INICIALES llevados a cabo por Paul Ehrlich. Demostraron que el sistema inmunitario de los vertebrados no atacaba normalmente los propios tejidos del animal. Ehrlich observó que si extraía sangre de un carnero (*a*) y la inyectaba en una cabra, la sangre actuaba como antígeno y el suero de la cabra lisaba, es decir, destruía, las células extrañas. Lo mismo ocurría (*b*) cuando extraía sangre de una cabra y la inyectaba en otra, pero si la sangre se inyectaba en el mismo animal del que se había extraído (*c*) no se producía lisis. Ehrlich denominó *horror autotoxicus* al principio biológico que determina que el sistema inmunitario distinga lo propio de lo extraño; es decir, no produzca autoanticuerpos.

forma de microorganismos, alimentos, drogas, venenos de las picaduras de insectos, etcétera. Un sistema inmunitario normal debe poseer linfocitos capaces de reconocer todos los antígenos con los que se encuentra a lo largo de la vida. El número es grande, pero no infinito. Las similitudes y solapamientos que presentan las estructuras de los diferentes antígenos permiten que alrededor de un millón de receptores linfocitarios distintos sean capaces de reconocer cualquier antígeno natural o sintetizado en el laboratorio. ¿Cómo puede el organismo generar tal diversidad de receptores en los linfocitos?

Se sabe actualmente que la parte del receptor de los linfocitos *B* que se combina con el antígeno es idéntica a la porción correspondiente del anticuerpo. Es decir, la especificidad del anticuerpo debe ser la misma que la del receptor de la superficie del linfocito que lo segrega. Además, los linfocitos contienen la programación genética necesaria para sintetizar moléculas receptoras específicas, por cuya razón cada linfocito posee capacidad de responder a un antígeno.

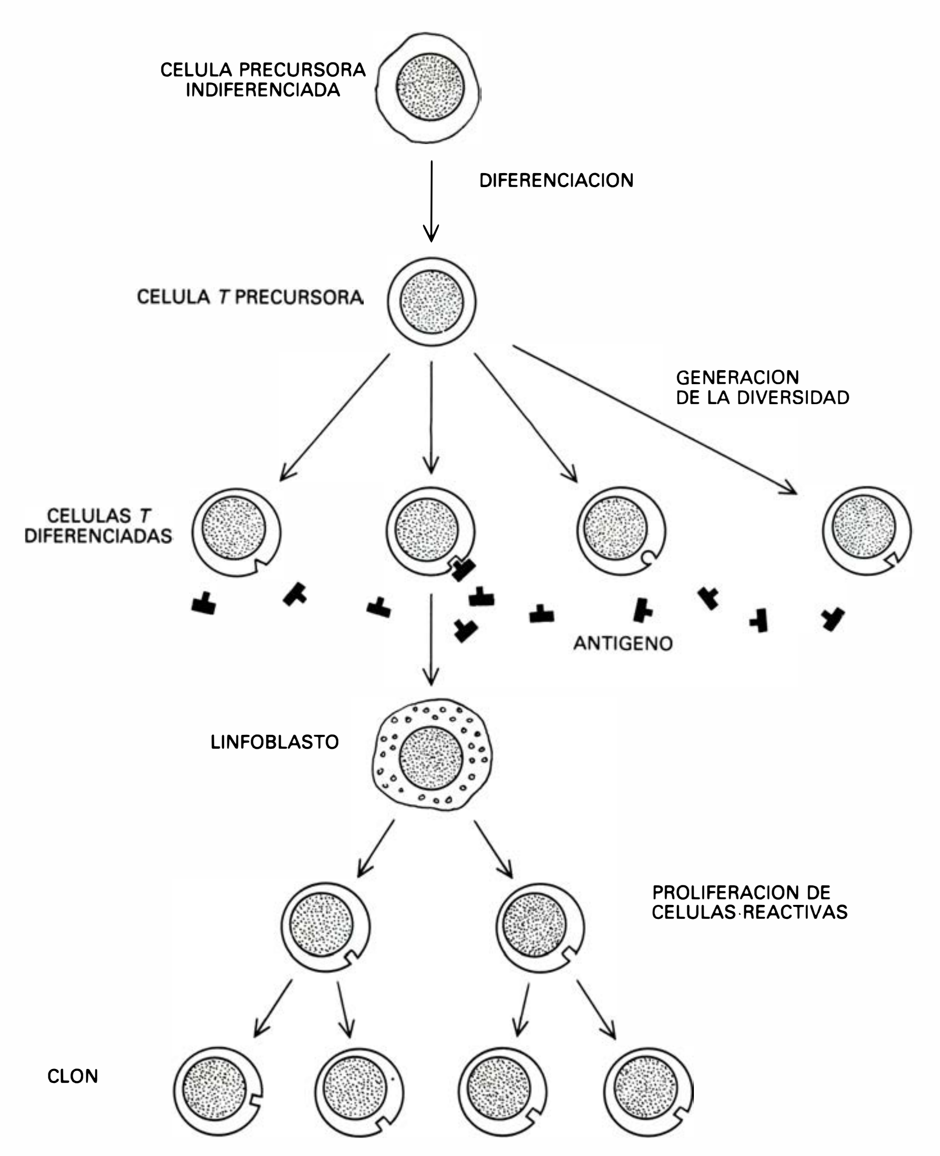
Dicha capacidad de reconocer los antígenos de forma específica radica en la secuencia de aminoácidos del receptor proteico de los linfocitos *B*. Las secuencias varían considerablemente entre los receptores de distintos linfocitos, por lo que se han denominado regiones variables (*V*) para distinguirlas de otras secuencias más constantes (*C*) de los receptores.

Para sintetizar la molécula del receptor, el linfocito debe seleccionar unos pocos genes *V* (los genes que codifiquen la síntesis de una determinada secuencia de aminoácidos) de entre una gran cantidad de genes del mismo tipo y unirlos a uno de los escasos genes *C*. La región variable está constituida por dos cadenas de aminoácidos, una pesada (*H*, del inglés, *heavy*) y otra ligera (*L*, del inglés, *light*). La región *V* de un receptor consta de los 110 aminoácidos terminales de cada cadena. Suponiendo que la célula pueda disponer de unas 100 regiones *V* diferentes para la cadena *H* y otras tantas para la cadena *L*, las combinaciones al azar proporcionarían 100 por 100, es decir, 10.000 sitios receptores distintos. Probablemente, mutaciones al azar en linfocitos precursores aumentarían el número de regiones *V* al menos hasta un millón en el momento del nacimiento, un número suficiente para acomodarse a la posible variabilidad antigénica. El número de genes *V* requeridos para un millón de especificidades distintas constituye menos del 0,1 por ciento del genoma humano, el conjunto de todos los genes del hombre.



PATRONES DE DESARROLLO de los linfocitos *T* y *B* a partir de células precursoras de la médula ósea. Las células *B* derivan directamente de las células precursoras; las células *T* se desarrollan bajo la influencia del timo. Cuando son estimuladas por un antígeno, las células *B* experimentan diferenciación en células plasmáticas, capaces de segregar anticuerpos que atacan a las bacterias y a los virus antes de que éstos entren en las células del organismo. Este tipo de respuesta es la denominada inmunidad humoral, o mediada por anticuerpos. Los linfocitos *T* ejercen sus efectos directamente. Se trata de la denominada inmunidad celular. Existen subclases de células *T*, las células *T* coadyuvantes, que interaccionan con las células *B* e intensifican la producción de anticuerpos. Otra subclase, las células efectoras, llevan a cabo directamente la destrucción celular y producen linfocinas, que son responsables de la hipersensibilidad retardada. Otra subclase de células *T*, las células supresoras, regulan ambas partes de la respuesta inmunitaria. Algunos macrófagos presentan los antígenos a las células *T* y *B* con una orientación adecuada. Otros son activados por linfocinas y destruyen los microorganismos invasores.

Aunque no se ha identificado con precisión la molécula receptora de los linfocitos *T*, ambos tipos de células, *T* y *B*, disponen del mismo número de genes *V* para la formación de receptores específicos en su membrana. Los dos tipos de linfocitos difieren notablemente en su respuesta frente a un antígeno. Tras su estimulación por el antígeno, las células *T* se diferencian en linfocitos de gran tamaño que liberan unos factores solubles denominados linfocinas. Se trata de proteínas de bajo peso molecular. Las linfocinas atraen linfocitos, macrófagos y otras células sanguíneas, induciendo una respuesta inflamatoria. Las células *T* son las mediadoras de las reacciones cutáneas de evolución lenta que normalmente se practican para el diagnóstico de muchas enfermedades producidas por bacterias, virus u hongos. La prueba consiste en la inyección subcutánea del supuesto patógeno; si el agente es responsable de la infección,



DESARROLLO DE CLONES, mecanismo a través del cual las células *T* y *B* responden a antígenos específicos. El proceso esquematizado hace referencia únicamente a las células *T*, pero es el mismo para las células *B*. El precursor del linfocito posee un receptor de su membrana capaz de interaccionar específicamente con un determinante antigénico particular. Cuando uno de estos linfocitos interacciona con un antígeno, se desencadena un proceso en el que aquél aumenta de tamaño dando lugar a linfoblastos, que luego se dividen secuencialmente. La división secuencial origina un clon de igual especificidad.

al cabo de 72 horas se observa en el sitio de la inyección una inflamación. La reacción se denomina de hipersensibilidad retardada.

La función de las células *T* y *B*

Las células *T* estimuladas por antígenos proporcionan los mecanismos de defensa frente a las infecciones bacterianas, víricas y micóticas, particularmente cuando tales agentes se encuentran en el interior de las células del organismo. Ciertas células *T* intervienen en el rechazo de órganos trasplantados y quizá también de ciertos tumores en desarrollo, destruyendo las células que poseen antígenos específicos. Las funciones de las células *T* reciben en conjunto el nombre de respuesta inmunitaria celular.

Los linfocitos *B*, si son estimulados, responden de una forma distinta: se diferencian en células plasmáticas que segregan grandes cantidades de anticuerpos, responsables de la eliminación de bacterias y virus extracelulares. Los anticuerpos no pueden penetrar en las células vivas, por lo que no resultan efectivos frente a microorganismos intracelulares. La concentración de anticuerpos puede determinarse fácilmente, y es, por tanto, un índice adecuado de la reacción inmunitaria aunque estos anticuerpos no proporcionen protección frente a determinados microorganismos.

Las células *B* y *T* difieren funcionalmente en otros aspectos. Habitualmente, una célula *B* no se estimula para producir anticuerpos sin la ayuda de las células *T*. Tal cooperación requiere una respuesta simultánea de las células *T* frente al mismo antígeno o contra otro determinante antigénico existente en la misma molécula. La activación de las células *T* requiere, a su vez, la intervención de un macrófago que presente el antígeno con una orientación adecuada.

Las interacciones de los macrófagos con las células *T*, que resultan esenciales para una respuesta inmunitaria efectiva, requieren que ambas células posean estructuras complementarias específicas en su superficie. La formación de tales estructuras está controlada por una familia particular de genes, denominados genes *I*. Los genes regulan la respuesta inmunitaria frente a antígenos altamente purificados en animales de una especie dada; controlan también las reacciones que se desarrollan cuando los macrófagos, células *T* y células *B* se mezclan en el tubo de ensayo o interaccionan en el organismo.

Resulta particularmente interesante el hecho de que los antígenos *I* estén estrechamente relacionados con los genes que codifican los antígenos de histocompatibilidad, antígenos responsables del rechazo del tejido trasplantado de un miembro de una especie a otro de la misma especie. Todos los vertebrados poseen un complejo de genes de histocompatibilidad que codifican los correspondientes antígenos de las superficies celulares. En los seres humanos, tal sistema de genes se denomina HLA y, en el ratón, H2. En ambas especies, los antígenos de histocompatibilidad constituyen marcadores de gran valor para los genes *I* que regulan la respuesta inmunitaria, y por esta razón los hemos mencionado aquí.

Tolerancia adquirida

Si consideramos la capacidad del sistema inmunitario para responder a los distintos antígenos extraños que invanden el organismo, resulta sorprendente la falta de respuesta frente a los autoantígenos. La hipótesis, de Burnet, de la selección clonal propone que durante la época embrionaria los linfocitos que entran en contacto y reconocen autoantígenos se destruyen, subsistiendo únicamente los linfocitos capaces de reconocer antígenos extraños.

Hace unos 25 años, P. B. Medawar y colaboradores, del University College de Londres, realizaron sus famosas investigaciones con trasplantes cutáneos para poner a prueba dicha teoría. Los experimentos consistieron en inyectar células vivas de bazo de una cepa de ratones en ratones recién nacidos de otra cepa genéticamente diferente. Cuando los ratones alcanzaron la vida adulta, se ensayó su capacidad para re-

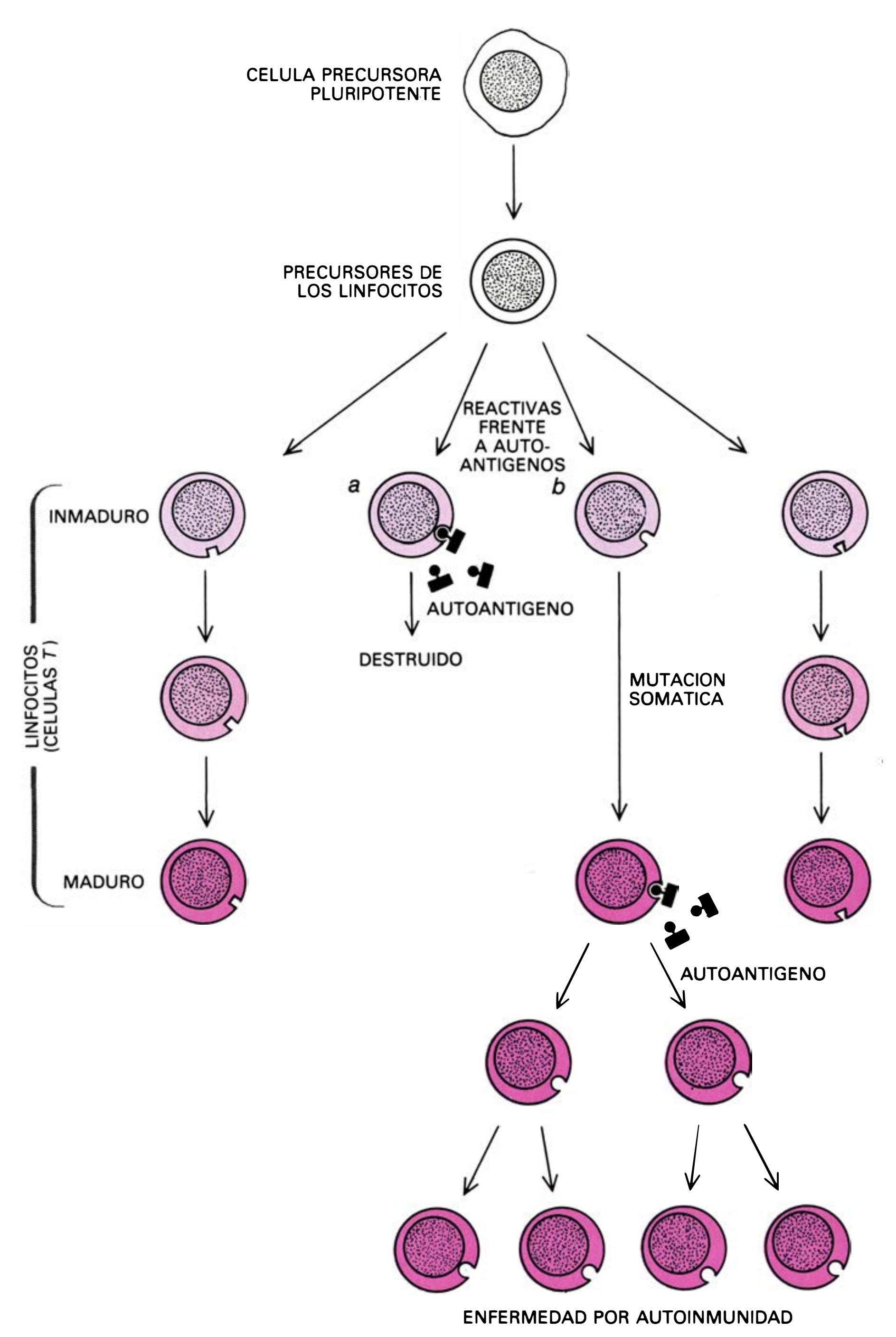
chazar injertos cutáneos de los mismos dadores. La piel trasplantada sobrevivió prácticamente de forma indefinida. La tolerancia inducida frente al tejido extraño se atribuyó a la destrucción de los linfocitos que habían entrado en contacto, en el ratón recién nacido, con los antígenos del dador. Es posible que el reconocimiento de lo propio se adquiera de la misma forma que la tolerancia inducida.

¿Cómo puede explicarse entonces la aparición de respuestas de autoinmunidad? Burnet propuso una explicación ingeniosa. Los linfocitos precursores dirigidos contra antígenos extraños pero relacionados con antígenos propios experimentarían mutación durante su multiplicación, dando lugar accidentalmente a linfocitos dirigidos contra antígenos propios. Cuando tiene lugar la estimulación por antígenos propios, estos linfocitos anormales proliferan y dan lugar a clones de linfocitos que atacan a los propios tejidos.

Las excepciones al mecanismo de autotolerancia no sólo tienen interés por sí mismas, sino por lo que revelan sobre los mecanismos normales de regulación inmunológica. Por ejemplo, ciertos antígenos no entran en contacto con el sistema circulatorio durante la fase inicial crítica del desarrollo embrionario en la que los linfocitos muestran la máxima susceptibilidad para la inducción de la tolerancia. Uno de estos antígenos se encuentra en los espermatozoides, que no aparecen en el testículo hasta una fase ulterior del desarrollo del organismo. Es más, los espermatozoides abandonan el organismo a través del conducto deferente y, hasta entrar en las vías espermáticas, están separados de la corriente sanguínea por la barrera hematotesticular, que impide su entrada en la circulación. Cuando se practica una vasectomía, una operación para el control de natalidad por esterilización masculina, los conductos espermáticos quedan bloqueados; los espermatozoides se ven entonces forzados a entrar en el organismo y provocan la formación de autoanticuerpos. La respuesta en general es inocua, aunque se recomienda una observación continuada.

Aquellos tejidos que no se encuentran tan bien aislados de la circulación general son menos propensos a producir autoanticuerpos. La inyección de extractos de la mayoría de los tejidos animales en el propio organismo raramente provoca la producción de anticuerpos. Muchos extractos de órganos, sin embargo, resultan antigénicos si se inyectan con un adyuvante, una sustancia que aumenta el carácter antigénico de otras sustancias. El adyuvante utilizado generalmente es el de Freund, que consiste en una emulsión de antígeno con aceite mineral y bacilos tuberculosos muertos. El adyuvante no sólo aumenta la producción de anticuerpos, sino que también incrementa, y de una manera destacada, la inmunidad celular. El adyuvante es, desde luego, una sustancia artificial y se discute cuál puede ser su equivalente natural.

Existen métodos para provocar experimentalmente enfermedades por autoinmunidad. Un caso bien estudiado es la enfermedad resultante de la inyección de mielina, la cubierta lipídica de las fibras nerviosas. La inyección de mielina junto al adyuvante de Freund provoca una enfermedad desmielinizante denominada encefalomielitis por autoinmunidad. Los datos actuales sugieren que la desmielinización se debe a los efectos de la inmunidad celular desencadenados por un componente de



CONCEPTO DE AUTOINMUNIDAD formulado en las postrimerías de la década de los 50 por F. M. Burnet. El desarrollo de los linfocitos *T* a partir de las células precursoras se ha representado esquemáticamente de tal forma que el incremento de la madurez quede simbolizado por una intensificación del color. En la situación normal (*a*), una célula *T* embrionaria que reacciona con un autoantígeno, es decir, un antígeno propio del organismo, es destruida al establecer contacto con tal antígeno. Los linfocitos que reaccionan con los tejidos del organismo son así eliminados. Pero otros linfocitos (*b*) pueden experimentar mutaciones y, al entrar en contacto con un autoantígeno, proliferan. Los clones anormales originados por este mecanismo darían lugar a enfermedades por autoinmunidad. Lo mismo valdría para las células *B*.

la mielina. Se detectan también anticuerpos circulantes frente a la mielina, pero su presencia no guarda relación con la gravedad de la enfermedad. Es más, la enfermedad puede transferirse de un animal afectado a otro normal inyectando células *T*, pero no inyectando suero que contenga anticuerpos, incluso cuando éste se inocula en grandes cantidades.

Enfermedades por autoinmunidad experimentales

La encefalitis experimental por autoinmunidad guarda cierta semejanza con algunas enfermedades humanas desmielinizantes, como la esclerosis múltiple, aunque en esta última no se haya confirmado aún plenamente el papel desempeñado por la autoinmunidad.

La mielina está formada por capas de material lipídico unidas a proteínas, una de las cuales es una proteína básica de pequeño peso molecular que constituye el autoantígeno. La proteína básica, aislada ya de la mielina en forma pura, consiste en una cadena única de 170 aminoácidos. Nueve aminoácidos, del 114 al 122 de la cadena, constituyen el determinante antigénico, es decir, la secuencia capaz de inducir encefalomielitis por autoinmunidad en cobayos. Sin embargo, Robert H. Swanborg, de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Wayne, descubrió que otra secuencia de la misma molécula (los aminoácidos comprendidos entre el 44 y el 89) determinaba resistencia a la encefalomielitis en los cobayos. En el animal normal, tal mecanismo sería importante para mantener la tolerancia frente a esta proteína básica de la mielina.

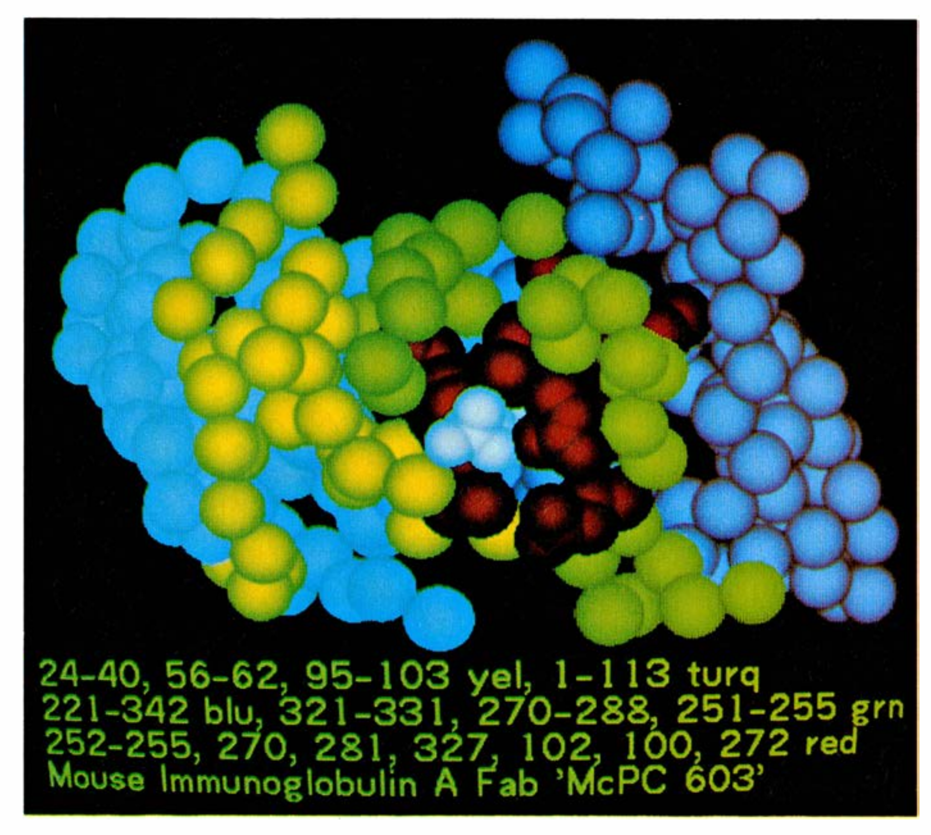
La mielina, al igual que los espermatozoides, se forma en una fase tardía del desarrollo embrionario, por lo que la tolerancia no aparece. Entre el sistema nervioso central y la sangre existe también una barrera, la barrera hematoencefálica. Estos hechos explicarían el potencial autoantigénico de la proteína básica de la mielina.

A comienzo de la década de los 50 inicié, en colaboración con Ernest Witebsky, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Buffalo, un estudio sistemático de los factores que evitan una respuesta autoinmunitaria frente a aquellos autoantígenos que, a diferencia de los espermatozoides y la mielina, no se encuentran aislados en el organismo. Como modelo de estudio elegimos la tiroglobulina, una proteína de gran tamaño sintetizada y almacenada en la glándula tiroides. Witebsky conocía, por experimentos realizados en Alemania antes de la segunda guerra mundial, que la tiroglobulina provenía exclusivamente de la glándula tiroidea, de modo que si se extirpaba la glándula se suprimía toda la tiroglobulina del animal. Resultaba posible entonces plantearse una cuestión elemental: ¿mantiene el organismo la tolerancia incluso después de haberse eliminado el autoantígeno? Para dilucidar la cuestión inyectamos tiroglobulina en conejos a los que se había extirpado la glándula tiroides y en conejos normales, utilizados de control. La respuesta fue inequívoca: no aparecía respuesta inmunitaria. La tolerancia persistía incluso en ausencia del autoantígeno.

Sin embargo, nos estaba reservada una sorpresa. Cuando la tiroglobulina se inyectaba junto al adyuvante de Freund, aparecían autoanticuerpos frente a la tiroglobulina. Los anticuerpos reaccionaban incluso con la tiroglobulina de los animales inmunizados. De hecho, podíamos extirpar la tiroides de un conejo e inmunizar luego al propio animal con su tiroglobulina junto al adyuvante de Freund. El resultado más sorprendente de los experimentos fue la observación de que la glándula tiroides de los conejos inmunizados aparecía infiltrada por linfocitos, macrófagos y otras células características de una respuesta inflamatoria.

El aspecto de la tiroides inflamada era semejante al observado en algunos casos de tiroiditis crónica en seres humanos. Recogimos el suero de algunos pacientes con esta enfermedad y detectamos la presencia de anticuerpos frente a la tiroglobulina humana. Independientemente, Ivan Roitt y Deborah Doniach, de la Facultad de Medicina del Hospital Middlesex de Londres, observaron en el suero de un gran número de pacientes afectos de tiroiditis crónica y otras alteraciones relacionadas la presencia de anticuerpos anti-tiroglobulina.

La demostración del papel desempeñado por los autoanticuerpos frente a la tiroglobulina en enfermedades de la glándula tiroides fue seguida de la demostración de la presencia de autoanticuerpos específicos en otras enferme-



SITIO DE COMBINACION DEL ANTICUERPO (o inmunoglobulina) determinante de la especificidad de los linfocitos *B*. Este sitio interacciona específicamente con el determinante antigénico. Las moléculas receptoras de los linfocitos *B* poseen una región constante y otra variable. El sitio de combinación se encuentra en la región variable y está constituido por segmentos de las cadenas pesada (*H*) y ligera (*L*) de la molécula receptora. El modelo del sitio de unión de un anticuerpo de ratón que se une a la fosfocolina se ha representado utilizando un sistema gráfico molecular desarrollado por Richard Feldmann, de los Institutos Nacionales de la Salud de los Estados Unidos. El azul corresponde a la cadena *L* de aminoácidos. El turquesa, a la cadena *H;* el amarillo y verde, a las cadenas hipervariables *L* y *H*, respectivamente, y el color rojo representa las cadenas laterales en contacto con la fosfocolina. El color blanco representa la fosfocolina, de la que se aprecia únicamente el grupo fosfato, puesto que la colina se encuentra por debajo de la superficie, en una hendidura. La estructura fue determinada por David R. Davies y colaboradores, del Instituto Nacional de Artritis, Enfermedades Metabólicas y Digestivas, de los Estados Unidos.

dades humanas, entre ellas, la diabetes juvenil, la miastenia gravis y la enfermedad de Graves. Los anticuerpos han sido a menudo de gran ayuda para el diagnóstico de esas enfermedades. Un nuevo campo de la inmunología clínica se ha desarrollado entorno a la detección de la presencia de autoanticuerpos para el diagnóstico de distintas enfermedades.

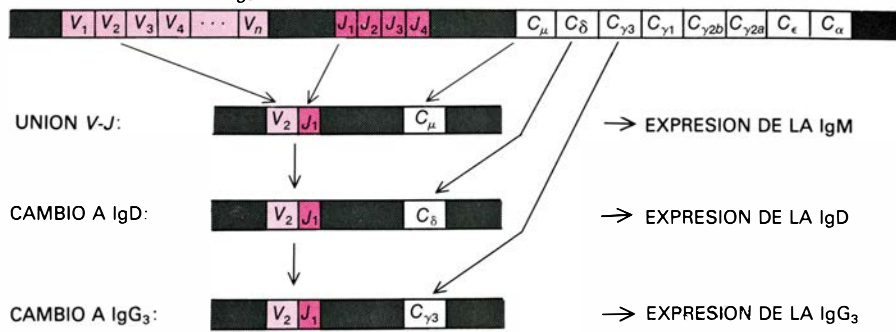
El hecho de que los conejos pudieran fácilmente inmunizarse frente a su propia tiroglobulina resultaba difícil de reconciliar con la hipótesis original de la supresión clonal. A diferencia de los espermatozoides y la mielina, la tiroglobulina se sintetiza en estadios tempranos de la vida fetal y circula en pequeñas cantidades, aunque significativas. Aún más paradójico resultaba el hecho de que los linfocitos capaces de unirse a la tiroglobulina estuvieran presentes tanto en conejos normales como en inmunizados. Según la teoría de la supresión clonal, no debían existir.

Supresión clonal parcial

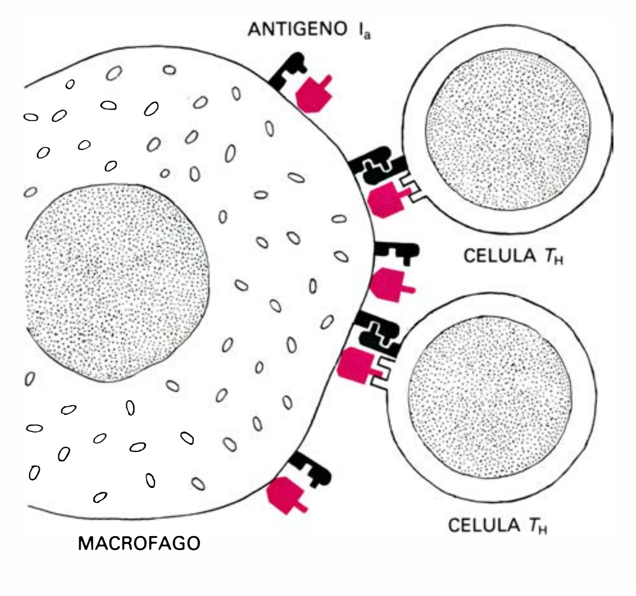
Las investigaciones de William O. Weigle, de la Fundación de Investigación y Clínica Scripps de la Jolla, California, proporcionaron una primera explicación de tales observaciones. Los estudios demostraron que, en general, era más fácil inducir tolerancia en las células *T* que en las células *B*. Podría ocurrir que los niveles circulantes de tiroglobulina fueran suficientes para bloquear la respuesta de las células *T* manteniendo activas las células *B*.

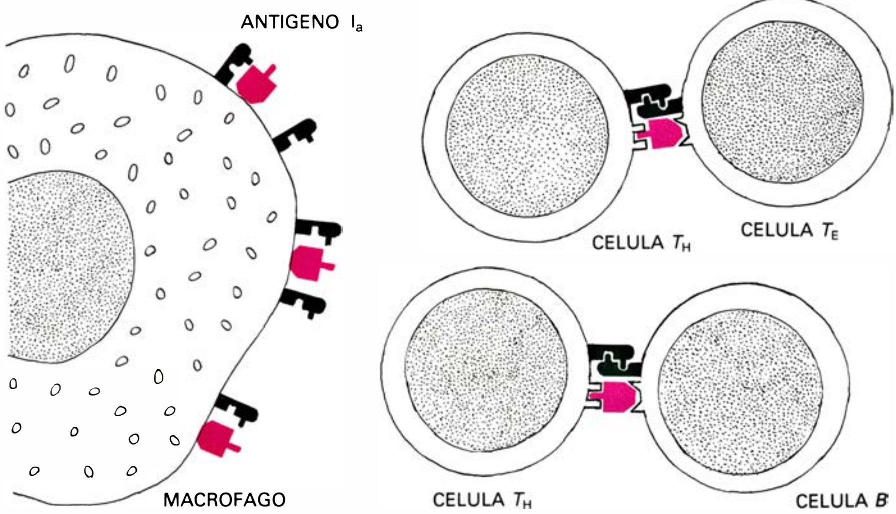
Las investigaciones de A. C. Allison y colaboradores, del Centro de Investigación Clínica del Consejo de Investigación Médica de Londres, y de Ian Mackay y colaboradores, del Instituto de Investigación Médica Walter y Eliza Hall, de Melbourne, demostraron que los seres humanos normales poseen linfocitos que se unen a la tiroglobulina. Esos expertos no pudieron demostrar la presencia en la sangre periférica de células *T* capaces de unirse a la tiroglobulina. Quizá, pues, una supresión clonal de células *T*, pero no de células *B*, explicase la autotolerancia a antígenos no aislados, tiroglobulina por ejemplo.

Weigle dio un paso adelante al demostrar que la autoinmunidad frente a la tiroglobulina podía provocarse en conejos si las células *T* dirigidas contra un antígeno relacionado interaccionaban con las células *B* activas frente a la tiroglobulina. Sus ingeniosos experimentos consistieron en introducir un determinante antigénico extraño en la tiroglobulina del conejo. Compuestos simples como el ácido arsanílico o sulfanílico



SINTESIS DE LA MOLECULA DE INMUNOGLOBULINA, que supone la selección por el linfocito *B* de un gen particular *V*, aquí V_2, entre un gran número de genes *V*. El gen *V* se une a través de uno de los genes *J*, aquí J_1, a uno de los escasos genes *C* (C_μ). El gen resultante contiene la información que determina la síntesis de un receptor específico para un antígeno particular. La región *V* consta de unos 110 aminoácidos. Ulteriormente, la célula utiliza un gen *C* diferente, C_δ, que determina la síntesis de inmunoglobulinas con una región constante, característica de las denominadas IgD. El nuevo segmento se une a la misma región variable. Un nuevo gen *C* (C_γ) determinará la síntesis de inmunoglobulina G.

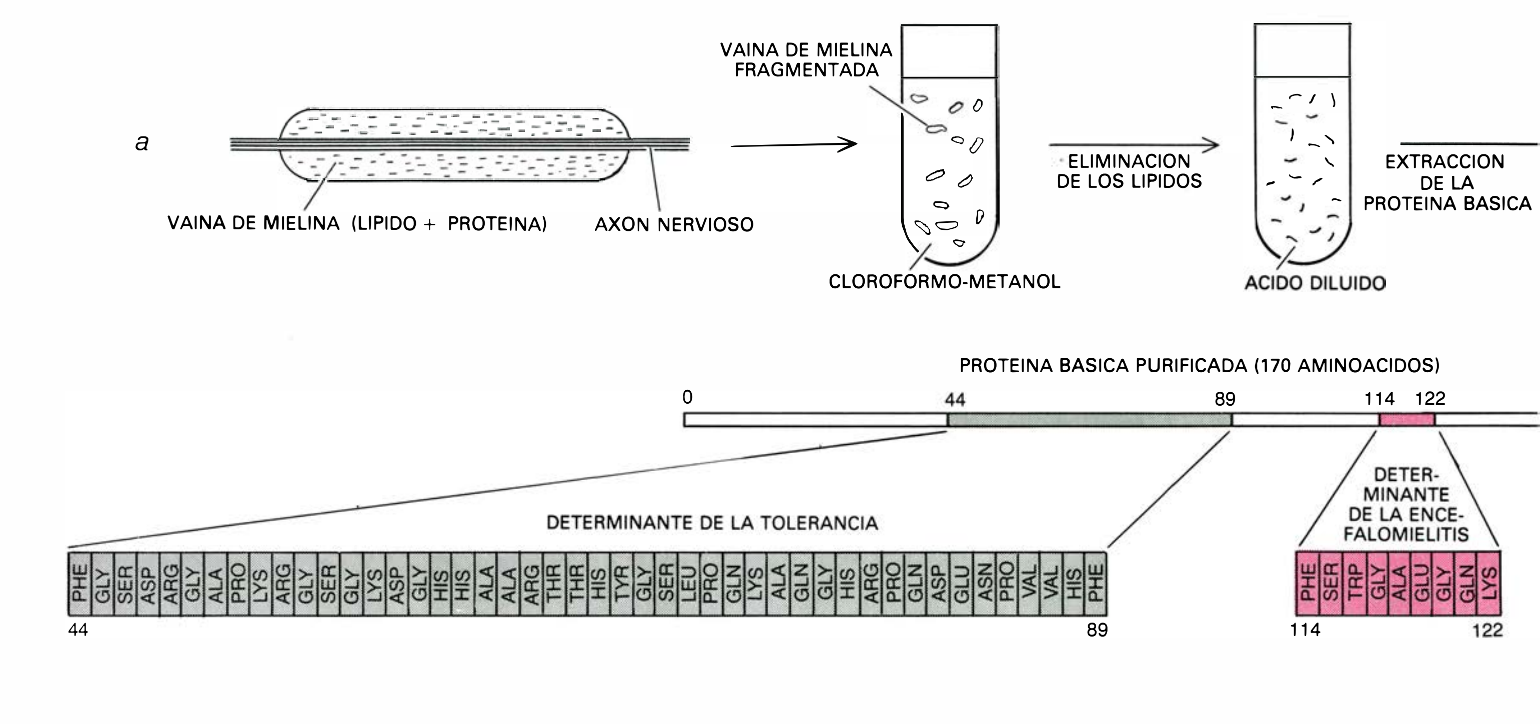


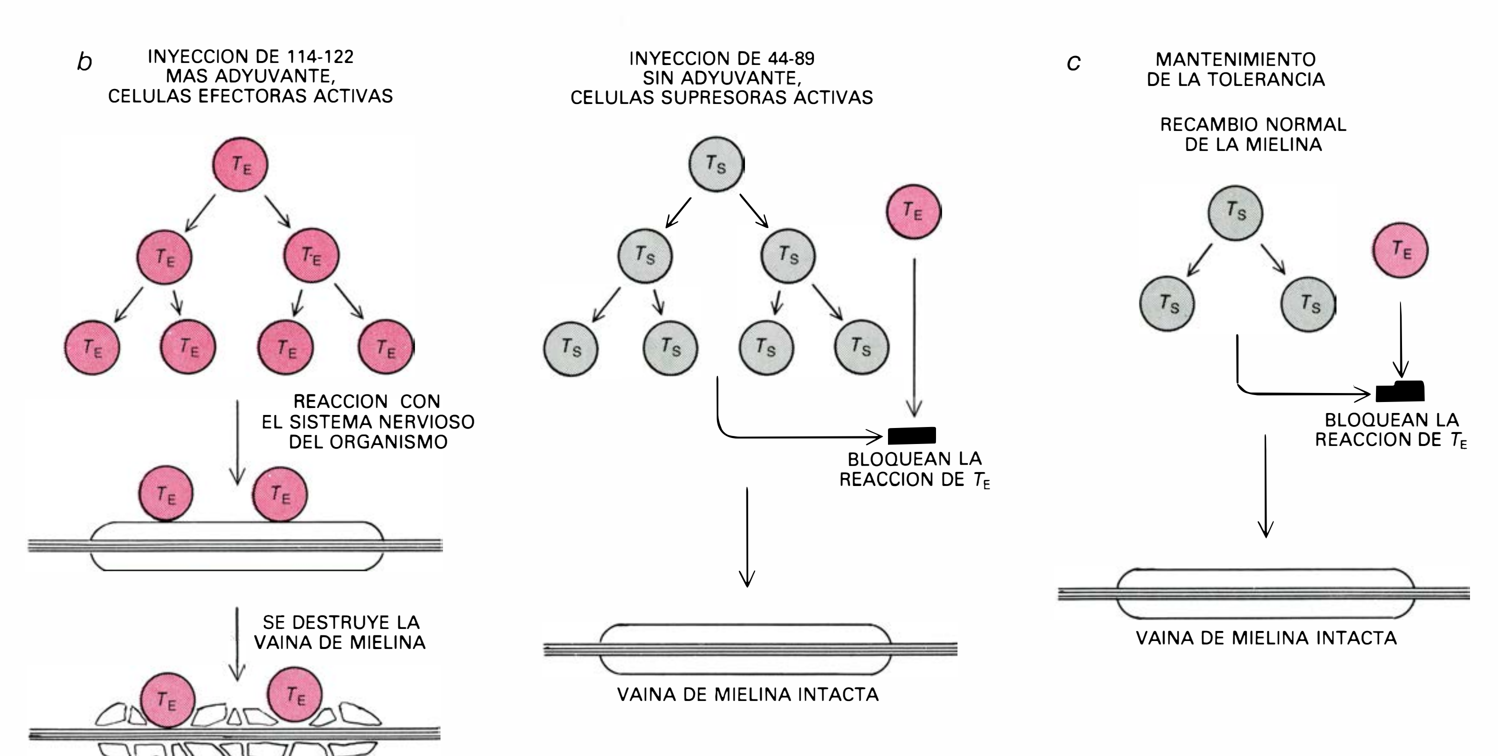


FUNCION DEL MACROFAGO en su interacción con las células *T* y *B*. Esta interacción resulta esencial para una adecuada respuesta inmunitaria. La capacidad de la célula T_H para reconocer a un antígeno depende de la adecuada presentación del antígeno (*color*) por una célula, en este caso el macrófago. El antígeno debe ser presentado en conjunción con un antígeno compatible I_a, cuya estructura está codificada por los genes *I* (genes de la respuesta inmunitaria). Tales genes controlan la formación de estructuras complementarias específicas en la superficie de los macrófagos y de las células T_H que determinan la adecuada presentación del antígeno. El macrófago y la célula T_H interaccionan, bien directamente con la superficie del macrófago bien indirectamente a través del antígeno I_a. Las células T_H pueden interaccionar asimismo con células T_E o con células *B*, siempre que las células compartan antígenos I_a, reconociendo el mismo determinante antigénico o un determinante distinto de la misma molécula de antígeno.

cumplían bien esta finalidad. Incluso sin requerir adyuvante de Freund, estas moléculas modificadas resultaban antigénicas, probablemente porque las células *T* estimuladas por los determinantes extraños eran capaces de cooperar con las células *B* que reaccionaban con la tiroglobulina del propio organismo.

El concepto de supresión de las células *T* da respuesta a muchas de las cuestiones planteadas por las reacciones de autoinmunidad, pero no a todas. Uno de los problemas sin resolver se refiere al control genético de la respuesta inmunitaria a la tiroglobulina. Hace algunos años, trabajando en colaboración con Adrian Vladutiu, de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Wayne, mostré que la respuesta de diferentes cepas de ratones frente a la tiroglobulina de la misma especie administrada con adyuvante de Freund era muy variable. Los ratones de algunas cepas producían grandes cantidades de

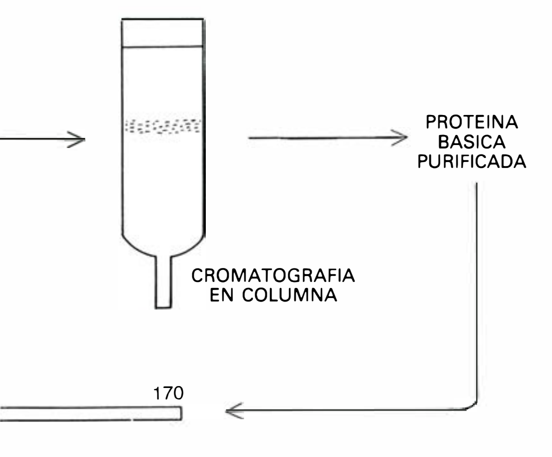


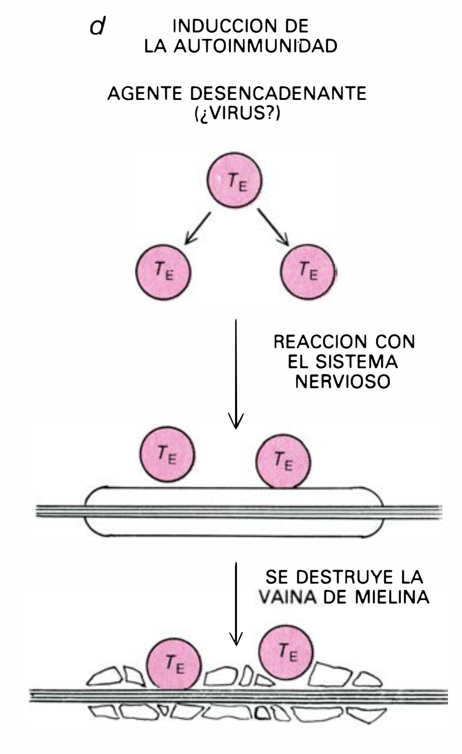


ENFERMEDAD POR AUTOINMUNIDAD inducida experimentalmente en animales inyectando la proteína básica extraída de la mielina, membrana que rodea y aísla las fibras nerviosas. Cuando se extrae la proteína básica (*a*), se aprecia que está integrada por una cadena de 170 aminoácidos. Dos regiones de la molécula están relacionadas con la autoinmunidad en algunas especies. Los aminoácidos comprendidos entre las posiciones 114 y 122 constituyen el determinante capaz de inducir la encefalomielitis. Por el contrario, los aminoácidos 44-89 constituyen una región que determina la falta de respuesta al antígeno, es decir, la tolerancia. Si el determinante de la encefalomielitis se inyecta con un adyuvante (*b*), estimula a los linfocitos *T* efectores (T_E), que reaccionan con el sistema nervioso del animal y destruyen las capas de mielina. Si previamente a tal inyección el animal es tratado con el segmento 44-89 sin adyuvante, la enfermedad puede evitarse. Distintos estudios han demostrado que las células *T* supresoras (T_S) son estimuladas y la respuesta de autoinmunidad queda bloqueada. Es problable (*c*) que la tolerancia natural a la proteína básica dependa de la liberación de pequeñas cantidades del seg-

anticuerpos y desarrollaban graves lesiones tiroideas, mientras que en otros casos la producción de anticuerpos era pequeña y las lesiones mínimas.

Los genes responsables de tales diferencias estaban ligados a los genes H2 y formaban parte del sistema de histocompatibilidad del ratón. De hecho, encajaban en la definición de genes *I* que regulan las reacciones de las células con función inmunitaria. Es más, la diferencia entre los animales que mostraban respuestas intensas y los que reaccionaban débilmente radicaba en las células *T*. Podía transformarse un animal de respuesta débil en uno de respuesta intensa destruyendo sus células *T* y sustituyéndolas por las células *T* de un animal de respuesta potente, aun en el caso de que el primer animal poseyera sus células *B* y macrófagos.





mento 44-89 en el recambio normal de la mielina. En el ambiente natural, un determinado agente desencadenante, como por ejemplo un virus, podría ejercer un papel similar al desempeñado por el adyuvante. El esquema se ha dibujado partiendo de una ilustración realizada por Robert H. Swanborg, de la Facultad de Medicina de Wayne.

Las células *T*, reguladoras

Los experimentos anteriores habían demostrado que las células *T* regulaban la respuesta frente a la tiroglobulina propia. ¿Qué papel podían desempeñar las células *T* reguladoras? Los experimentos realizados junto a Yi-Chi M. Kong e Isao Okayasu, en los que se inyectaba tiroglobulina en ratones sin adyuvante, nos dieron una respuesta. Los ratones no suelen responder a tales inyecciones. Siguen así, aun cuando ulteriormente se administre la tiroglobulina con un adyuvante, el método tradicional para provocar la tiroiditis por autoinmunidad. Matamos algunos de los ratones que no respondían e inyectamos células *T* obtenidas de sus bazos en ratones normales de la misma cepa que no habían sido tratados. Estos ratones no mostraron respuestas al tratamiento inmunizante tradicional con tiroglobulina.

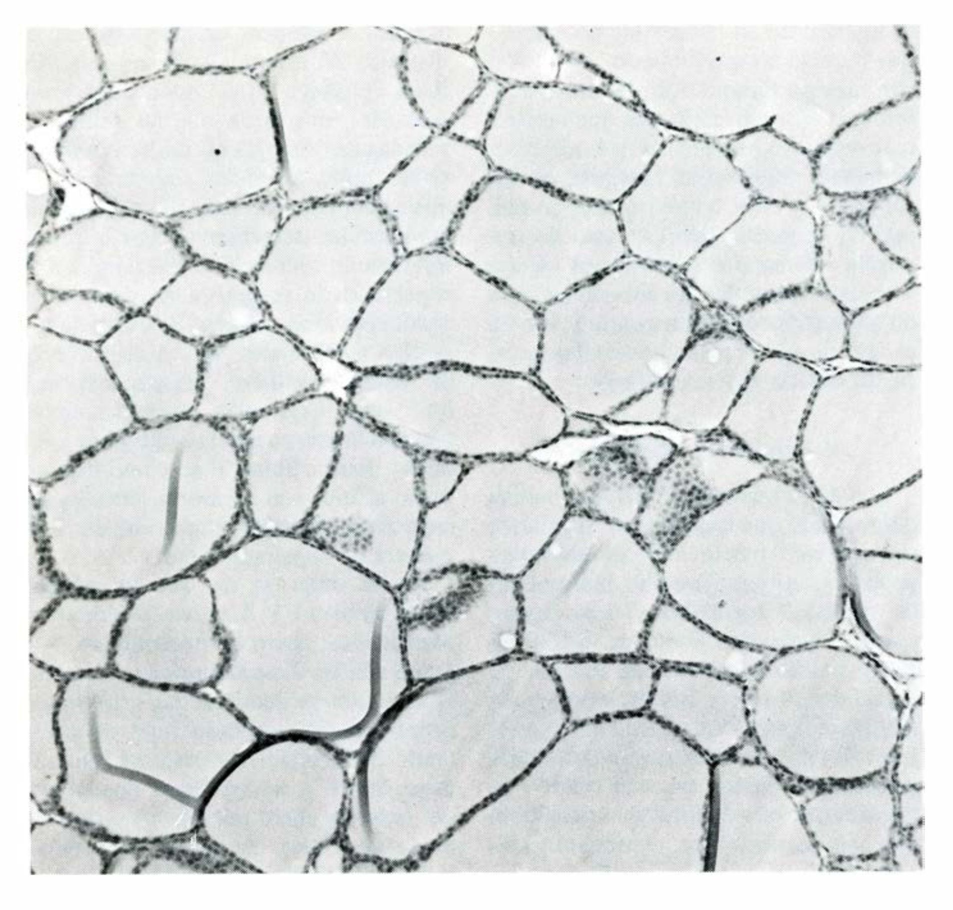
Los resultados de las investigaciones mostraron que, al inyectar tiroglobulina propia sin adyuvante, se inducía la proliferación preferencial de linfocitos *T* que suprimían la respuesta inmunitaria frente a esta tiroglobulina. El concepto de células *T* supresoras es relativamente reciente en inmunología. Se basa en las investigaciones de Peter McCullagh, de la Universidad Nacional Australiana, y de Richard K. Gershon y Kazunari Kondo, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, a comienzos de la última década. Estos investigadores estudiaban la inducción de tolerancia inmunológica en animales que habían recibido grandes dosis de glóbulos rojos de carnero. Descubrieron que la transferencia de células *T* de un animal que toleraba los glóbulos rojos de carnero suprimía específicamente en el receptor la respuesta frente a tales células, pero no frente a otros antígenos.

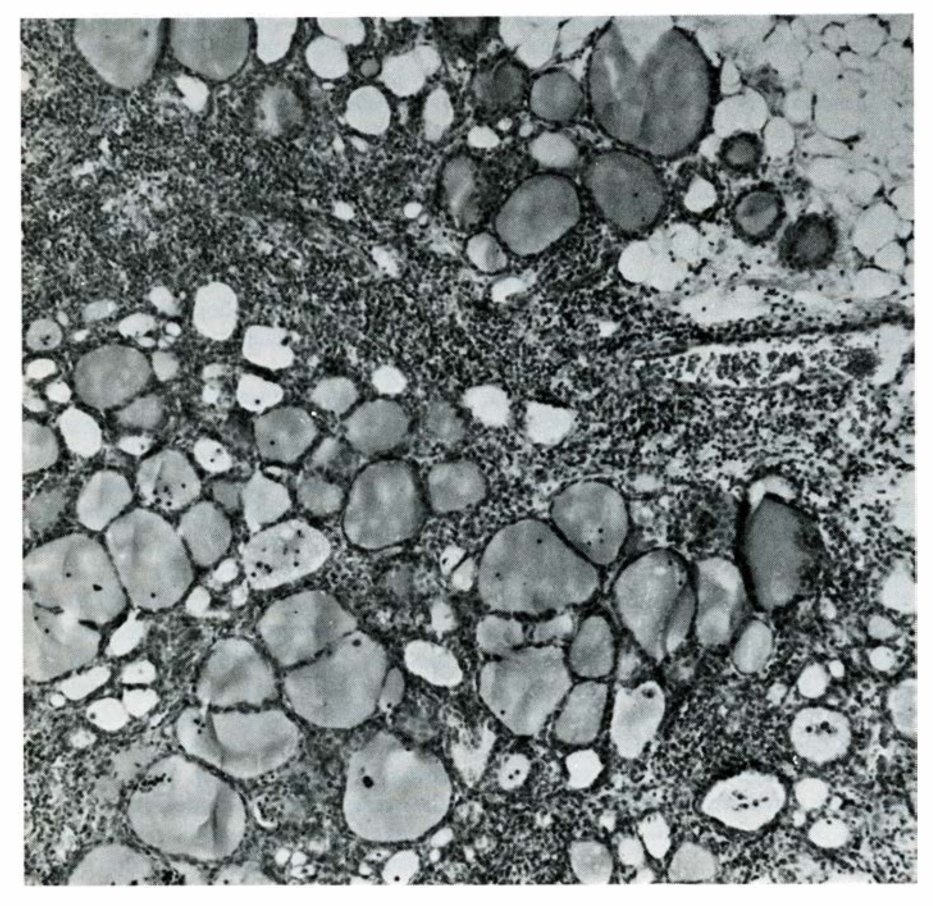
Al mismo tiempo, se realizaban experimentos sobre la inducción de células *T* autorreactivas en otros laboratorios. Jeannine Charreire y Patrick Yeni, del Hospital Necker de París, utilizando el método desarrollado en el Instituto Weizmann de Israel por Michael Feldman, Irun Cohen y Hartmut Wekerle, mostraron que las células *T* aisladas del organismo podían inmunizarse frente a células tiroideas de la misma cepa de ratones. El grado de inmunización, determinado por la proliferación de células *T*, correspondía a la capacidad de respuesta de cada cepa particular. Las células *T* estimuladas podían mantenerse dos o tres semanas en medio de cultivo. Transcurrido ese intervalo, respondían específicamente frente a la misma célula estimulante. Es decir, estas células *T* se comportaban como células con memoria, dotadas de capacidad específica para reiniciar respuestas de autoinmunidad.

No se duda ya de que un animal posea células *T* y *B* activas frente a autoantígenos, como la tiroglobulina. Algunas células *T* ocasionarían la respuesta autoinmune mientras que otras la suprimirían. El resultado final determinante de la acción del sistema inmunitario frente a un antígeno dependerá del balance entre tales factores positivos y negativos. El punto importante que han desvelado los citados experimentos es que, para mantener la tolerancia, no hay por qué eliminar totalmente los linfocitos que reaccionan con autoantígenos, pero sí debe predominar la supresión.

El balance entre fuerzas coadyuvantes y supresoras puede desplazarse por una serie de fenómenos internos o externos. La presentación de un antígeno, con o sin adyuvante, es decisiva y también lo es la situación genética del organismo huésped. Otros factores, como las funciones endocrinas y las infecciones víricas, pueden alterar el equilibrio inmunológico.

Marianne Bielschowsky, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Otago, Nueva Zelanda, obtuvo una cepa de ratones (New Zealand black, NZB) que se distingue por desarrollar una serie de fenómenos de autoinmunidad durante su corta vida. A los tres meses de edad los animales sufren una anemia hemolítica, resultante de la destrucción de los glóbulos rojos por autoinmunidad. Más adelante, el bazo y numerosos ganglios linfáticos aumentan de tamaño y aparecen numerosos autoanticuerpos, entre ellos algunos que reaccionan con el núcleo de diversas células. Anticuerpos antinucleares se observan también en la enfermedad humana por autoinmunidad denominada lupus eritematoso sistémico. La muerte prematura de estos ratones NZB se debe, generalmente, a una insuficiencia renal ocasionada por la for-





TIROIDITIS POR AUTOINMUNIDAD, enfermedad que aparece espontáneamente y que puede inducirse experimentalmente inyectando tiroglobulina y adyuvante de Freund completo. La micrografía superior muestra una sección de glándula tiroidea normal de conejo. La inferior muestra una sección de la tiroides obtenida de un conejo inyectado con tiroglobulina de conejo y adyuvante. La tiroides aparece aquí infiltrada por linfocitos y macrófagos. La tiroiditis crónica humana muestra un aspecto similar.

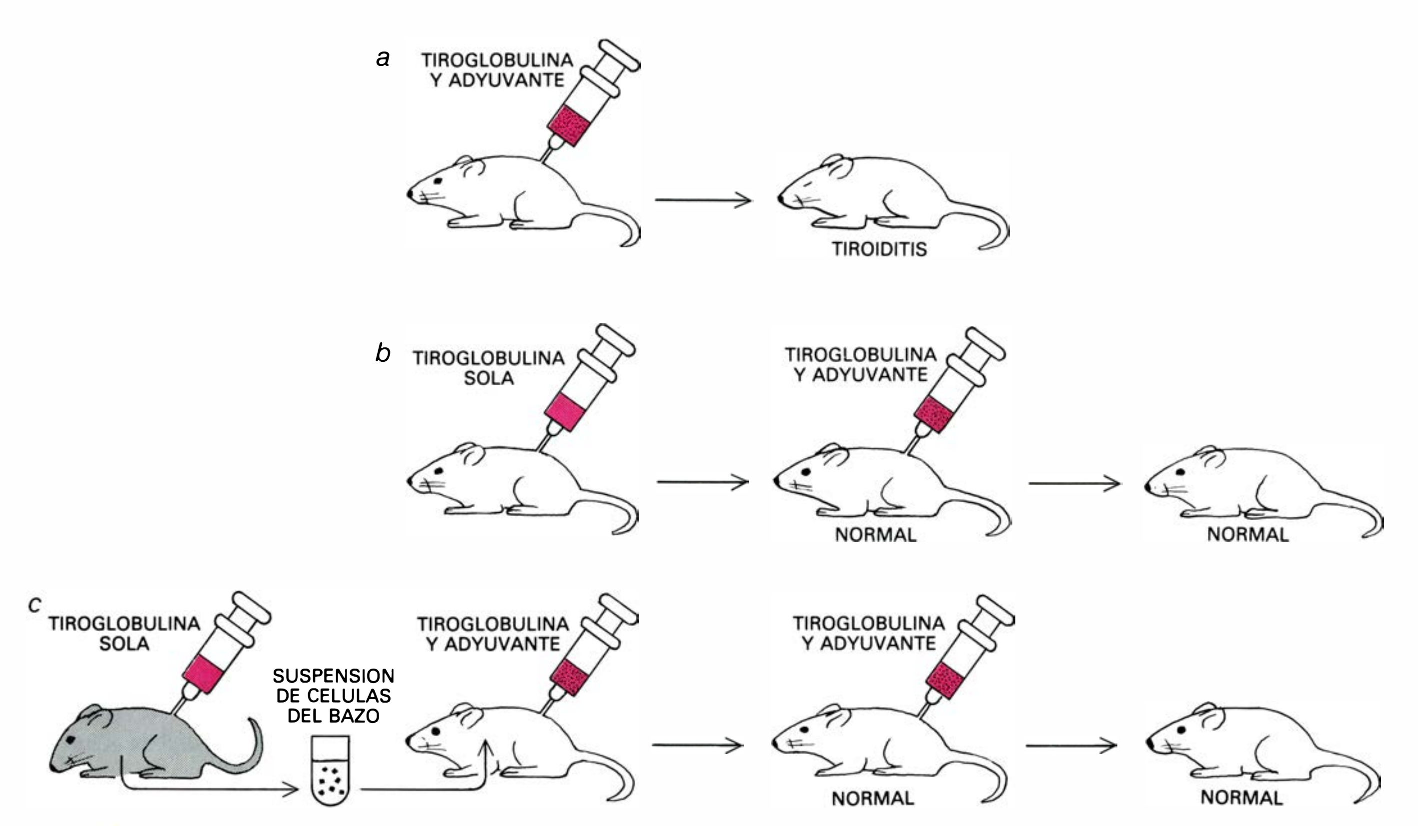
mación de depósitos de antígeno-anticuerpo en los glomérulos renales. Si los ratones viven lo suficiente, en muchos de ellos aparecen cánceres del sistema linfático.

Los ratones blancos de Nueva Zelanda (NZW) no sufren enfermedades por autoinmunidad, y la duración de su vida es normal. Cuando se cruzan ambas cepas, ratones blancos NZW y negros NZB, los híbridos sufren graves enfermedades por autoinmunidad. La anemia hemolítica no es tan pronunciada como en el progenitor NZB, pero las lesiones renales son más graves. Los anticuerpos antinucleares se presentan en la mayoría de animales. La enfermedad es muy parecida al lupus eritematoso sistémico.

El origen de la enfermedad por autoinmunidad en los ratones de Nueva Zelanda ha sido durante largo tiempo sujeto de controversia. Evidentemente, existe un componente genético. Algunos investigadores afirman haber aislado virus que producen síntomas semejantes a los del lupus, pero datos recientes ponen en duda tales hallazgos. El desarrollo del sistema inmunitario de los ratones de Nueva Zelanda es anormal, tal como muestra el hecho de que en los animales jóvenes se induzca la tolerancia con dificultad. Quizás exista un defecto en el timo; hay datos que demuestran una deficiencia de células *T* en los primeros estadios de la enfermedad.

Estudios genéticos

Recientemente, los estudiosos han dirigido su atención hacia las células *B* del ratón que se muestran hiperactivas mucho antes de la aparición de la autoinmunidad. La proporción de células *B* de gran tamaño con inmunoglobulinas en su superficie es elevada. Esta modificación es característica de la activación de las células *B* para producir anticuerpos. Puesto que estas anomalías ocurren en ratones desprovistos de timo, no pueden considerarse resultado de la estimulación por células *T*. Posiblemente, los precursores de las células *B* de la médula ósea sean anormales, ya que es posible transferir las manifestaciones de autoinmunidad a ratones normales a través de células precursoras de la médula ósea de ratones de Nueva Zelanda. La conducta relativamente autónoma de las células *B* de los ratones de Nueva Zelanda, que segregan inmunoglobulinas con independencia de las instrucciones procedentes de las células *T*, se asemeja a la de las células malignas. Aunque los factores que inducen a las células *B* a exhibir este comporta-



EXPERIMENTOS CON TIROGLOBULINA; muestran resultados variables según la inyección. Si un ratón es inyectado con tiroglobulina y adyuvante completo de Freund (*a*), se induce tiroiditis experimental. Un ratón al que se inyecta únicamente tiroglobulina no evidencia respuesta (*b*) y no desarrolla tiroiditis, aun cuando ulteriormente se le administre tiroglobulina y adyuvante. Si se extirpa el bazo del ratón y se inyecta una suspensión de células del bazo en un ratón normal (*c*), no se observa tampoco respuesta. Las células del bazo vivas transmiten la falta de respuesta. (Ilustración de Bunji Tagawa.)

miento no se conocen, las células responden a un programa genético. El error en el programa de control inmunológico da lugar a múltiples enfermedades por autoinmunidad.

Estudiando otra enfermedad genética en la que la respuesta por autoinmunidad afecta a un solo órgano, se han podido obtener nuevos datos sobre estos procesos. Los pollos de una cepa determinada, designada OS, sufren insuficiencia tiroidea a causa de una tiroiditis grave. La cepa fue obtenida por Randall K. Cole, de la Universidad Cornell, y la estudiaron en detalle Witebsky y sus colaboradores Joseph H. Kite, Jr., y George Wick. Witebsky detectó la presencia de anticuerpos frente a la tiroglobulina en el suero de pollos OS, demostrando con ello que se trataba de una enfermedad por autoinmunidad.

En colaboración con Larry Bacon y Roy Sundick, hemos identificado varios defectos genéticos en la cepa OS que predisponen a los pollos al desarrollo espontáneo de la tiroiditis por autoinmunidad. Por un lado, los pollos responden intensamente a la tiroglobulina de la propia especie. Esta característica se hereda en conjunción con el sistema de histocompatibilidad. Además, los pollos presentaban un defecto generalizado en la maduración del timo. Las células *T* con capacidad de mediar la inmunidad celular abandonaban el timo a una edad más temprana que en pollos normales y se instalaban en tejidos periféricos.

La anomalía en el desarrollo del timo determina probablemente que los autoantígenos como la tiroglobulina alcancen las células efectoras *T* antes de estar presentes las células supresoras. Finalmente, los pollos OS muestran una alteración intrínseca de la función tiroidea, consistente en que la captación de iodo por la tiroides (el iodo es un constituyente principal de la hormona tiroidea) es mayor durante la vida embrionaria, mientras que la producción de hormonas tiroideas es normal o reducida. La glándula tiroides se muestra por tanto refractaria a la regulación normalmente ejercida por la hipófisis. Todas estas alteraciones de la glándula se manifiestan antes de la aparición de la enfermedad por autoinmunidad.

Consecuentemente, la aparición espontánea de la enfermedad por autoinmunidad en la cepa de pollos OS depende de la conjunción de tres lesiones genéticas independientes. Un gen que determina una intensa respuesta a la tiroglobulina, una anormalidad del timo que reduce el efecto de los supresores en relación con los efectores y un defecto de la glándula tiroides.

La información obtenida del estudio de las enfermedades por autoinmunidad en animales de experimentación podrá aplicarse a la resolución de los problemas planteados por esas enfermedades en los seres humanos. Las investigaciones clínicas han puesto de manifiesto que una proporción elevada de pacientes humanos con enfermedades por autoinmunidad posee tipos particulares de HLA. En algunos casos, la asociación entre un tipo de HLA y la enfermedad es tan constante que tiene valor práctico. Así ocurre en pacientes de diabetes por autoinmunidad. Debido a que este tipo de diabetes requiere tratamiento permanente con insulina, la información respecto al sistema HLA tiene un considerable valor.

Enfermedades por autoinmunidad en el ser humano

Los estudios clínicos han puesto de manifiesto que las enfermedades por autoinmunidad se dan predominantemente en determinadas familias. Así, la incidencia de autoanticuerpos frente a la tiroglobulina es mucho mayor en personas con familiares que padecen alguna enfermedad de la glándula tiroides. Tales pacientes presentan también con mayor frecuencia autoanticuerpos frente a la corteza de la glándula suprarrenal y la mucosa gástrica. Los anticuerpos se encuentran a menudo en pacientes con insuficiencia suprarrenal o

en pacientes de anemia perniciosa, enfermedad producida por la incapacidad del estómago de segregar un factor requerido para la absorción de la vitamina B-12. La presencia de tan diversas enfermedades producidas por autoinmunidad en ciertas familias sugiere la existencia de una alteración del control inmunológico que normalmente ejerce el timo.

Muchas de las enfermedades por autoinmunidad son más comunes en la mujer que en el hombre. La desigual distribución según el sexo sugiere que el sistema endocrino, a través de las hormonas sexuales, ejerce algún papel en la regulación del sistema inmunitario. Recientemente, Norman Talal y colaboradores, del Hospital Clínico de la Universidad de California en San Francisco, y Alfred D. Steinberg, del Instituto Nacional de Artritis y Enfermedades Metabólicas y Digestivas, han demostrado que es posible retardar la aparición de la enfermedad por autoinmunidad en hembras híbridas NZB-NZW de ratón extirpando sus ovarios y tratándolas con hormonas masculinas. Estos resultados abren nuevas perspectivas en el tratamiento de las enfermedades por autoinmunidad tales como el lupus eritematoso sistémico.

La mayoría de enfermedades por autoinmunidad afectan a pacientes de distintas edades, si bien los autoanticuerpos frente a uno u otro tejido aparecen con más frecuencia en edades avanzadas, aunque no vayan acompañados de signos de enfermedad. Con el paso del tiempo, los errores genéticos tienden a acumularse en las células, incluyendo las poblaciones de linfocitos que regulan la respuesta inmunitaria. Los cambios observados en el sistema inmunitario en relación con la edad sugieren que es necesario un esfuerzo activo a cargo de las células supresoras para mantener el control inmunológico.

Perspectivas futuras

El posible papel de los virus en las enfermedades producidas por autoinmunidad sigue siendo objeto de estudio de muchos investigadores. Las infecciones víricas pueden alterar por varios mecanismos el delicado equilibrio característico de las respuestas que evitan la autoinmunidad. Los virus que permanecen en determinados tipos celulares pueden determinar la expresión de nuevos antígenos relacionados con los autoantígenos de la superficie celular. Por otra parte, los virus pueden dañar a las células *T* que regulan las reacciones inmunitarias. Hasta ahora no se han determinado con precisión los mecanismos responsables de la acción de los virus en las enfermedades por autoinmunidad en el ser humano.

La autoinmunidad es un mecanismo importante en la patogenia de distintas enfermedades humanas. Un estudio estadístico realizado en un importante hospital clínico mostró que el 18 por ciento de los pacientes sufrían enfermedades con participación destacada del sistema inmunológico. Algunas de estas enfermedades pueden ahora comprenderse mucho mejor gracias a los estudios experimentales de autoinmunidad. Por ejemplo, el descubrimiento de que la autoinmunidad interviene de una manera sobresaliente en el lupus eritematoso sistémico ha permitido utilizar drogas inmunosupresoras como un tratamiento efectivo de esta enfermedad, deteniendo lo que un día se consideró un proceso inexorable y fatal. También la miastenia gravis mejora, en ciertos casos, utilizando procedimientos que disminuyen el nivel de autoanticuerpos circulantes.

El análisis de autoanticuerpos es ya una práctica de rutina para el diagnóstico de enfermedades tales como el lupus eritematoso sistémico, la tiroiditis, la artritis reumatoide, algunas formas de enfermedad hepática progresiva e incluso el pénfigo, una grave enfermedad de la piel, hasta ahora fatal. Resulta, pues, evidente que los trabajos experimentales destinados a descifrar los mecanismos de la autoinmunidad han sido fructíferos, proporcionando avances prácticos tanto en el tratamiento como en el diagnóstico de distintas enfermedades.

Los estudios de la autoinmunidad han abierto también nuevas perspectivas para la comprensión de los mecanismos implicados en la respuesta inmunitaria. Si bien la teoría de la supresión clonal de Burnet es aún útil en un sentido amplio, ha sido notablemente modificada. Del conocimiento actual de las diferentes funciones específicas de determinadas poblaciones celulares y de sus interacciones positivas y negativas se deduce que el sistema inmunitario está constituido por una compleja red en la que se requiere un continuo intercambio de información entre las células. La perturbación de cualquier elemento de la red puede afectar a todas las interacciones dinámicas. La búsqueda de los mecanismos a través de los cuales el organismo puede distinguir lo propio de lo extraño ha hecho posible que comencemos ya a descifrar el lenguaje que utilizan las células del sistema inmunitario para comunicarse entre sí y también con otras células del organismo.

Los ciclos de actividad de las estrellas

Se han observado variaciones de actividad semejantes al ciclo de 11 años de las manchas solares en 91 estrellas próximas. Su estudio revelará por qué se produce el ciclo y por qué en ocasiones desaparece

Olin C. Wilson, Arthur H. Vaughan y Dimitri Mihalas

En 1610, Galileo descubrió que la superficie luminosa del Sol presentaba manchas oscuras. Del movimiento de éstas sobre la superficie, dedujo que el Sol completaba una revolución aproximadamente cada 27 días. Desde entonces, se ha podido demostrar la asociación entre las manchas solares y una rica variedad de complejos fenómenos solares: los campos magnéticos, las violentas explosiones de las fulguraciones solares, las fluctuaciones en el "viento" de partículas electrificadas lanzadas por el Sol hacia el espacio y el ciclo completo de la actividad solar. A medida que los astrónomos profundizaron en el conocimiento de la actividad del Sol, se aprestaron a buscar señales de actividad semejante en estrellas próximas que se parecieran al Sol por su edad, masa y otras características. Fruto de una investigación iniciada en 1966 por uno de los autores (Wilson), en el Observatorio del Monte Wilson, puede afirmarse ya que muchas otras estrellas semejantes al Sol muestran realmente ciclos de actividad análogos a los de éste.

Con unos 4500 millones de años de antigüedad, el Sol no alcanza la mitad de la edad de las estrellas más antiguas de nuestra galaxia. Se le clasifica como una estrella enana situada en la banda principal del diagrama de Hertzsprung-Russell, en el que se representa la magnitud absoluta de las estrellas en función de su temperatura. El Sol es una de las muchas estrellas de edad mediana que todavía no han consumido su provisión inicial de hidrógeno combustible. La energía liberada en su interior por la fusión termonuclear del hidrógeno para dar helio es transportada hacia la superficie por una combinación de radiación y convección, dominando esta última en la cuarta parte más externa del radio solar. La convección es el transporte de energía calorífica por movimiento físico de materia. Cesa inmediatamente debajo de la fotosfera, que es la más profunda de las capas visibles del Sol; más hacia el interior, el transporte lo realiza sólo la radiación. La agitación de masas calientes de gas bajo la fotosfera, en combinación con la rotación del Sol, obliga a la materia de la superficie, situada a diferentes latitudes y profundidades, a girar con velocidades angulares que difieren de un modo apreciable.

A esa rotación diferencial se la supone hoy causa principal de la actividad solar y de su carácter cíclico. Todas las estrellas de la banda principal cuya masa es inferior a 1,5 veces la masa del Sol deberían poseer corrientes de convección, de una intensidad afín, en sus capas exteriores. Hay varios cientos de tales estrellas lo suficientemente cerca del sistema solar para facilitar la búsqueda de analogías de la actividad solar en la radiación que emiten.

Pero esas estrellas no están tan cerca como para permitir la observación directa de manchas solares o, mejor dicho, manchas estelares en ellas. ¿Cómo seguir adelante, pues? Según veremos, el éxito se ha alcanzado a través de la medición precisa de la intensidad del "núcleo" de emisión en dos líneas espectrales de átomos de calcio ionizados una vez (átomos de calcio a los que se ha arrancado un electrón) en la cromosfera de las estrellas. Se llama cromosfera solar a la atmósfera exterior del Sol, magnéticamente dominada, que aparece como un relámpago de brillantes colores inmediatamente antes e inmediatamente después de un eclipse solar total. En primera aproximación, constituye la capa atmosférica entre la fotosfera y la corona, esto es, entre la superficie visible del Sol y la porción más externa, extremadamente caliente, de su atmósfera.

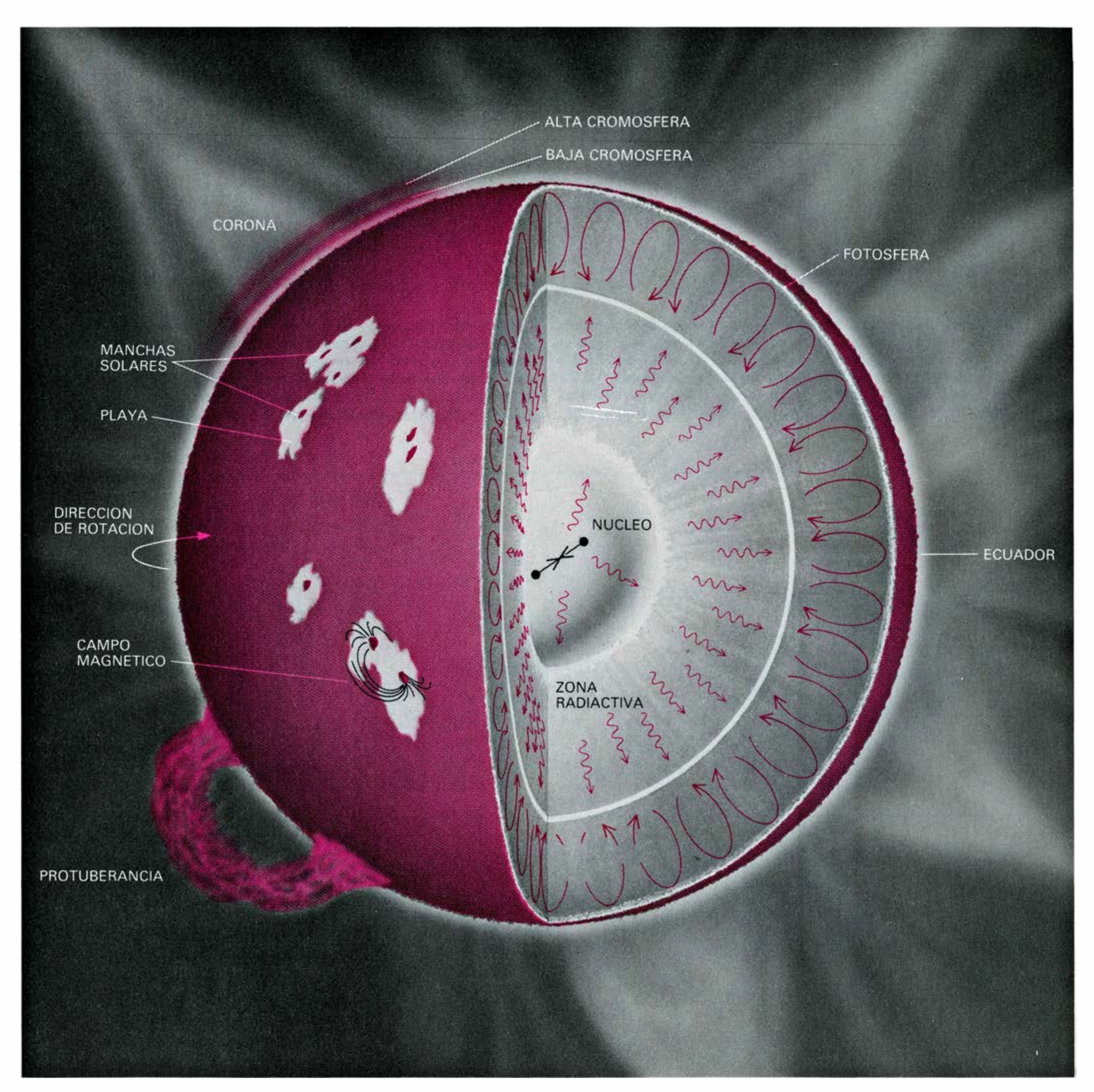
Se sabe que los núcleos de emisión en las dos líneas de emisión del calcio (las líneas *H* y *K* de Fraunhofer, con longitudes de onda de 3968,470 y 3933,664 unidades angström, en la parte ultravioleta próxima del espectro) se refuerzan en regiones de alto flujo magnético del Sol. Por consiguiente, era razonable suponer que se podría observar una intensificación semejante en el flujo de radiación de las estrellas enanas próximas si se aislaban las líneas *H* y *K* y se observaban a lo largo de un intervalo suficiente. La observación fructuosa de las fluctuaciones de las líneas *H* y *K* de las estrellas semejantes al Sol, iniciada hace 14 años en el Observatorio del Monte Wilson, está suministrando a los teóricos muestras de ciclos de actividad estelar que en algunas estrellas difieren notablemente del único ejemplo del que se disponía hasta entonces: el Sol. Ello permite comparar modelos teóricos de actividad estelar con el comportamiento de objetos de masas, composiciones y edades diferentes de las del Sol. Este esfuerzo, que se encuentra en su primera infancia, debe acabar por proporcionar un cuadro detallado del mecanismo responsable del propio ciclo de actividad solar.

Se apreciará mejor la importancia de los ciclos de actividad que hemos observado en otras estrellas si recapitulamos brevemente lo que se sabe acerca del ciclo solar, sus manifestaciones y sus probables causas y consecuencias. Aparte de algunas lagunas en un principio, el registro de actividad de las manchas solares alcanza hasta su descubrimiento por Galileo en 1610. En 1843, Heinrich Schwabe mostró que el número medio de manchas solares observadas por año varía con un pronunciado ciclo de unos 11 años. Poco después,

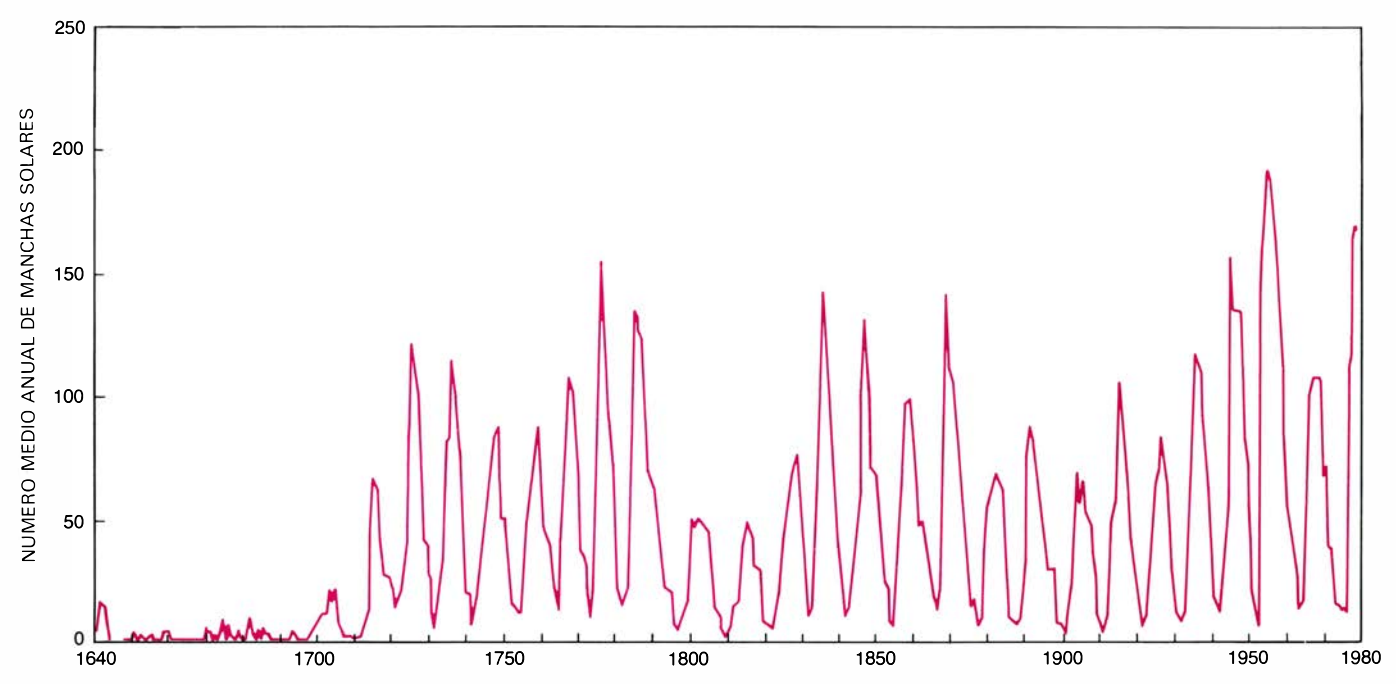
Rudolf Wolf reconstruyó el ciclo hasta aproximadamente el año 1700 con ayuda de los antiguos registros de los observatorios.

De no haber sido por la casi total ausencia de manchas solares a lo largo del intervalo de 70 años transcurrido desde 1645 hasta 1715, el ciclo de esas manchas solares podría haberse descubierto mucho antes. Los astrónomos del siglo XX no aceptaron la existencia de este período anormal hasta pasado mucho tiempo desde que lo describiera E. Walter Maunder en 1894. Y Maunder prestó atención a ese fenómeno porque, cinco años antes, se enteró de su existencia por un artículo de Gustav Spörer. En reconocimiento del esfuerzo que Maunder realizó durante toda su vida por establecer la realidad del período de 70 años de déficit de manchas solares, éste se conoce ahora como el mínimo de Maunder. Ya no se pone en duda su veracidad.

A mediados del siglo XIX, Richard Carrington hizo dos importantes observaciones acerca del Sol y su actividad.



ACTIVIDAD Y ESTRUCTURA DEL SOL, esquematizadas en este dibujo. Una y otra se basan, en parte, en observaciones y, parcialmente también, en modelos teóricos. Cabe presumir que las características del Sol son compartidas por todas las estrellas cuyas masas no superen 1,5 veces la solar y cuya magnitud absoluta y temperatura las sitúe en la banda principal del diagrama de Hertzsprung-Russell. Tales estrellas extraen su energía de las reacciones termonucleares que ocurren en su núcleo, y que convierten hidrógeno en helio. La energía así liberada se transporta hacia el exterior mediante fotones, es decir, radiación electromagnética. Aproximadamente en el tercio más externo del radio del Sol, el transporte de la energía se efectúa por convección: la "ebullición" de los gases. En la fotosfera (la superficie visible del Sol), la energía vuelve a radiarse hacia el exterior por fotones. La temperatura de la fotosfera es de 5730 grados Kelvin. En la cromosfera, las temperaturas suben progresivamente hasta alcanzar aproximadamente un millón de grados en la corona. De vez en cuando, protuberancias gigantes hacen erupción desde la superficie solar (*ilustrada abajo, a la izquierda*). El Sol presenta también un ciclo de actividad, típicamente de 11 años de duración, marcado por un rápido incremento en el número de manchas solares seguido de un descenso más lento. Las manchas solares, que marcan regiones de actividad magnética, hacen erupción generalmente en parejas de polaridad magnética opuesta. A lo largo del ciclo solar, la fracción de la superficie del Sol cubierta por las "playas", o zonas muy calientes, puede variar desde cero hasta más del 20 %.



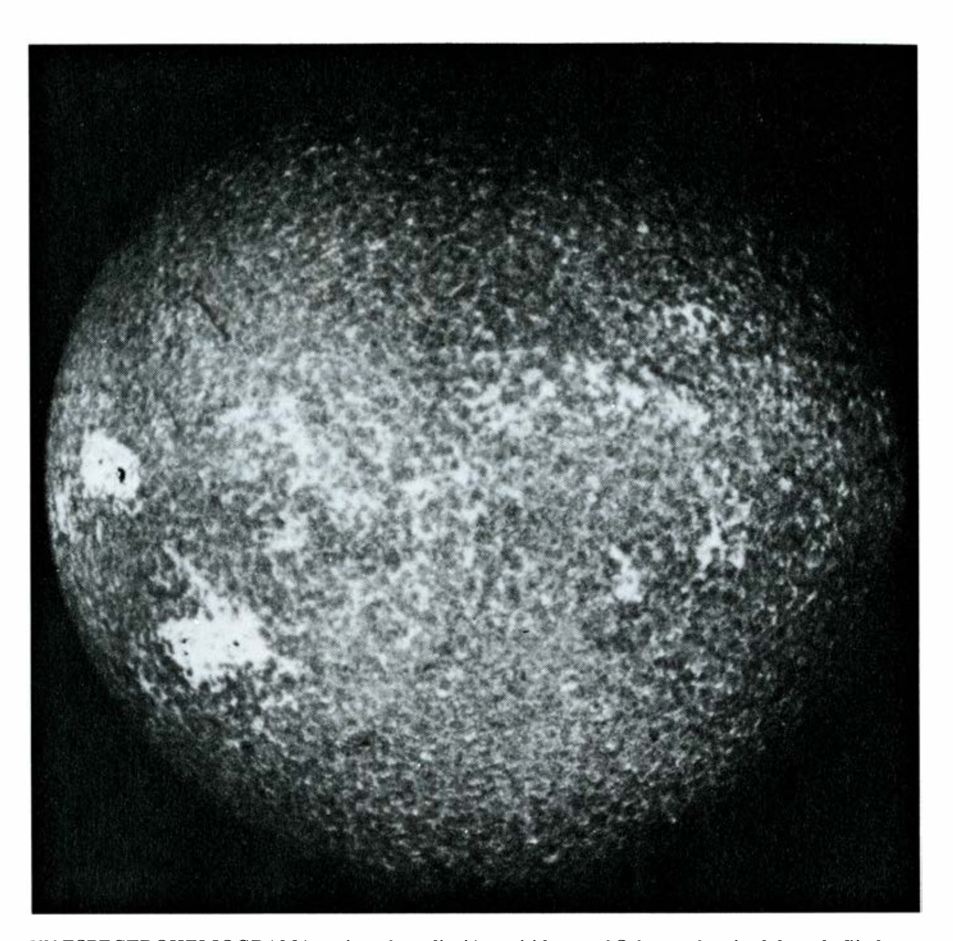
IRREGULARIDAD DEL CICLO de manchas solares, según pone de manifiesto el registro histórico. El número medio de manchas solares representa el número anual de manchas y grupos de manchas que se ven en la superficie del Sol por año. A partir del descubrimiento de las manchas solares por Galileo Galilei en 1610, haciendo uso de un telescopio, las observaciones se realizaron esporádicamente hasta aproximadamente el año 1640. Desde 1645 a 1715, período ahora llamado el mínimo de Maunder (en honor de Walter Maunder), las manchas solares eran tan escasas que la actividad cíclica del Sol no se manifestaba. A partir del primer máximo de actividad solar apreciable, en 1715, se han observado máximos de amplitud irregular a intervalos de aproximadamente 11 años. A lo largo de dos ciclos, que abarcan pues unos 22 años, el campo magnético solar se invierte, permutando ambos polos magnéticos.

LATITUD
+50 +45 +40 +35 +30 +25 +20 +15 +10 +5 0 −5 −10 −15 −20 −25 −30 −35 −40 −45 −50
1954 1956 1958 1960 1962 1964 1966 1968 1970 1972 1974 1976 1978

LA DISTRIBUCION EN "MARIPOSA" de la actividad de las manchas solares aparece cuando se representan las latitudes a las cuales los grupos de manchas solares hacen su primera aparición en función de los meses sucesivos a lo largo del ciclo solar completo de 22 años. La configuración muestra que, al principio de cada semiciclo de 11 años, las manchas solares aparecen primero a latitudes muy alejadas del ecuador, para después hacerlo cada vez más cerca a medida que el ciclo progresa. Cuando surge cada grupo de manchas, se representa en el diagrama mediante una línea vertical de un grado de longitud a la latitud apropiada. Las líneas más largas simbolizan la aparición de dos o más grupos a latitudes adyacentes. Algunos grupos del ciclo anterior todavía están presentes cuando comienza el nuevo ciclo. La distribución en mariposa la descubrió Maunder, quien había llamado la atención sobre el mínimo de manchas solares de 70 años de duración. El diagrama se ha construido a partir de datos obtenidos por Robert F. Howard.

Mostró que, en el curso de cada ciclo, las manchas solares tendían, en un comienzo, a aparecer a altas latitudes solares para ir surgiendo luego, de una manera progresiva, más cerca del ecuador solar. Carrington también hizo notar que el Sol no gira como un cuerpo sólido: las manchas solares del ecuador se mueven a una velocidad mayor que las manchas solares de latitudes más altas. Cuando se inscriben las posiciones de las manchas solares en un ciclo completo, la migración de las manchas hacia el ecuador origina una configuración en "mariposa". El primer diagrama de esta clase fue publicado por Maunder en 1922.

La significación física completa de las manchas solares comenzó a aparecer cuando George Ellery Hale, del Observatorio del Monte Wilson, demostró en 1908 que todas las manchas solares se hallan asociadas a intensos campos magnéticos, típicamente varios miles de veces más intensos que el campo magnético de la superficie terrestre. A partir de su estudio de las manchas solares, pudo deducir cierto número de notables leyes. Encontró que las manchas generalmente aparecen en parejas de polaridad magnética opuesta. Mostró que, en cada hemisferio solar, la mancha guía de tales parejas bipolares tiene casi siempre la misma polaridad y que, en el otro hemisferio, la mancha guía de las parejas ostenta casi siempre la polaridad opuesta. Además, Hale encontró que, en los sucesivos ciclos de manchas solares, las polaridades de la mancha guía se intercambian, de modo que el verdadero ciclo solar es un ciclo magnético con un período de 22 años y no de 11. Trabajos más recientes muestran que se producen cambios periódicos semejantes en el campo magnético total del Sol.



UN ESPECTROHELIOGRAMA registra la radiación emitida por el Sol a una longitud de onda fijada, en este caso 3933,644 unidades ångström, en el centro de una de las dos intensas líneas de absorción existentes, la *K* de los átomos de calcio despojados de un electrón. La fotografía muestra el Sol el día 11 de septiembre de 1961, hacia el final del ciclo de manchas solares más activo nunca registrado. La fotografía fue tomada por T. Cragg con el telescopio en la torre de 20 metros del Monte Wilson. (El Norte se halla en la parte superior y, el Este, a la izquierda.) La imagen está dominada por un tosco reticulado de células de "supergranulación", aproximadamente de unos 30.000 kilómetros de diámetro, que dificultan la percepción de las manchas solares. Sin embargo, puede verse una de ellas cerca de la gran "playa" en la proximidad del borde oriental. Las células de supergranulación se deben a corrientes de convección que ascienden verticalmente en el centro de la célula y se expanden horizontalmente hacia fuera. Las corrientes horizontales parecen arrastrar elementos de campo magnético hacia las paredes de las células, donde se acumulan para formar la red. Las células quizá tengan una vida de unas 20 horas de duración. En los magnetogramas solares, que muestran la intensidad y distribución de los campos magnéticos del Sol, podemos apreciar que el retículo de células se encuentra en íntima asociación con líneas del campo magnético confinadas en estrechos tubos de flujo; éstos originan la mayor parte de la emisión de la línea *K* que se registra en el espectroheliograma. En el estudio sobre los ciclos de actividad en otras estrellas, se buscan variaciones en la emisión a las longitudes de onda de la línea *K* y de la *H*, de 3968,470 Å.

La explicación teórica de este comportamiento cíclico, que goza de una aceptación amplia aunque no universal, comienza con la amplificación de campos magnéticos "semilla" cerca de la superficie del Sol a causa de una complicada interacción de la convección y la rotación diferencial, esbozada en 1961 por Horace W. Babcok, del Monte Wilson. Como el Sol gira más rápidamente en el ecuador que en la vecindad de los polos, las líneas de fuerza magnética tienden a alargarse y arrollarse alrededor del Sol paralelamente a la dirección de su rotación. Con el tiempo, quizá como resultado de la convección, algunas de las líneas muy juntas entre sí forman un vértice, de modo que las líneas de fuerza se separan de la superficie. Un par de manchas bipolares representaría, por tanto, dos regiones muy próximas donde las líneas del campo emergerían de la superficie y retornarían después hacia ella. Así se explica, pues, la polaridad opuesta de las manchas. La hipótesis se puede ampliar para explicar cómo se invierte periódicamente el campo magnético general del Sol. Muchos detalles importantes de este cuadro quedan, sin embargo, incompletos; e indicaciones recientes sugieren la necesidad de recurrir a procesos que ocurren más al interior del Sol de lo que se considera en el modelo.

Hace unos 15 años, E. N. Parker, de la Universidad de Chicago, argumentó, basándose en consideraciones teóricas, que la corona o porción más externa de la atmósfera solar no estaba unida al Sol por efecto del campo gravitatorio de éste. Las capas de la corona escapan del Sol y dan lugar al viento solar. La naturaleza de esta corriente es intensamente afectada por los campos magnéticos. En regiones donde las líneas de fuerza del campo magnético se cierran, el viento solar se anula. Sin embargo, en las regiones recientemente identificadas como agujeros en la corona, las líneas de fuerza del campo magnético se abren hacia el espacio interplanetario. Aquí el viento solar, formado por gas altamente ionizado, escapa libremente, llevando consigo campos magnéticos aprisionados hasta grandes distancias entre planetas y más allá. Tales agujeros coronales se producen sobre regiones de baja actividad de la superficie solar. De vez en cuando, los agujeros se forman cerca del ecuador solar, lo suficiente como para que

2 JULIO 1954
5 JUNIO 1956
9 OCTUBRE 1957
17 ABRIL 1960
7 AGOSTO 1964

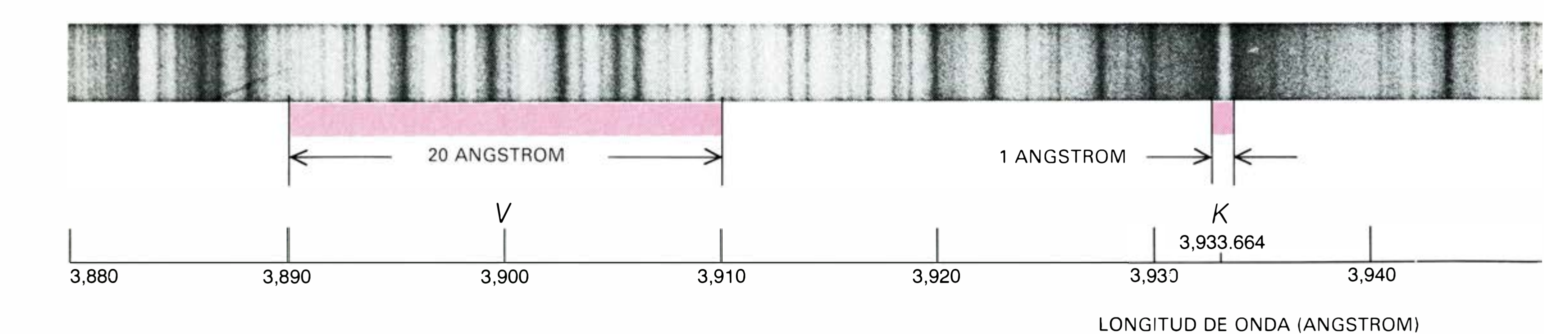
NUMERO "ZURICH" DE MANCHAS SOLARES
275
250
225
200
175
150
125
100
75
50
25
0
1954
1956
1958
1960
1962
1964

VARIACIONES EN LOS ESPECTROHELIOGRAMAS tomados a la longitud de onda de la línea *K* del calcio para cinco puntos representativos durante el ciclo de actividad solar n.º 19, que se extiende desde 1954 hasta 1964. A lo largo de este ciclo, el número "Zurich" de manchas solares alcanzó un máximo absoluto de 200 en la curva suavizada de medias mensuales. La curva irregular muestra las variaciones en el número de manchas solares de un mes al siguiente. La corta duración del crecimiento y la lenta desaparición caracterizan el ciclo de actividad solar. Los espectroheliogramas revelan cómo las regiones activas, visibles cual "playas" brillantes, cambian de área y emigran hacia el ecuador durante el ciclo, según detallan los diagramas de mariposa.

las partículas ionizadas y los campos magnéticos aprisionados se extiendan hacia el sistema solar a lo largo del plano de la órbita terrestre. Las partículas y los campos interaccionan entonces fuertemente con la ionosfera terrestre, región electrificada de la atmósfera superior, produciendo manifestaciones aurorales y perturbando las comunicaciones a larga distancia.

La actividad solar incide también de una forma notable en el flujo de rayos cósmicos, iones y electrones de alta energía y origen desconocido que constantemente bombardean la Tierra. Cuando el Sol se halla en un estado activo, su campo magnético y los campos magnéticos transportados por el viento solar curvan las trayectorias de las partículas de rayos cósmicos incidentes y reducen el número de ellas que penetran en la atmósfera terrestre. La reducción de flujo comporta la deceleración de la velocidad a la que los rayos cósmicos transmutan nitrógeno 14 en el isótopo radiactivo carbono 14 en la atmósfera superior.

En el curso de la fotosíntesis, las plantas en crecimiento incorporan pequeñas cantidades de carbono 14 (que



ESPECTROGRAMA AMPLIADO de una estrella próxima, la HD 22049. Dicho espectrograma nos muestra las líneas de emisión *H* y *K* medidas por los autores al seguir de cerca los ciclos de actividad estelar. Su fotómetro *H-K* compara la intensidad de las líneas de emisión *H* y *K* con la intensidad de bandas 20 veces más anchas en el fondo continuo, que son o bien más violetas (*V*) o bien más rojas (*R*) que las líneas *H* y *K*. Las mediciones proporcionan el

tiene una semivida de 5730 años) en sus tejidos, junto con el isótopo corriente carbono 12. Midiendo el contenido de carbono 14 en los anillos de árboles antiguos, aunque en buen estado de conservación, los investigadores han podido reconstruir la historia de la abundancia del carbono 14 en la atmósfera hasta más de 7000 años atrás. Este notable archivo, que fue uno de los argumentos que convencieron a los científicos sobre la realidad del mínimo de Maunder, revela que, en épocas muy anteriores, el ciclo de manchas solares atravesó por anomalías de larga duración semejantes. El mínimo de Maunder coincidió estrechamente con una serie de años de un rigor climático desconocido en Europa, llamada a veces Pequeña Edad de Hielo; esa circunstancia despertó un renovado interés por la posibilidad de que, mediante mecanismos todavía por aclarar, la actividad solar pueda tener consecuencias de largo alcance sobre el clima de la Tierra. Se trata, empero, de posibilidad muy discutida. Las enseñanzas del mínimo de Maunder son inmediatas: los astrónomos no conocen todavía en qué consiste el ciclo solar, y su deseo de profundizar en el mismo no puede reputarse mera curiosidad ociosa.

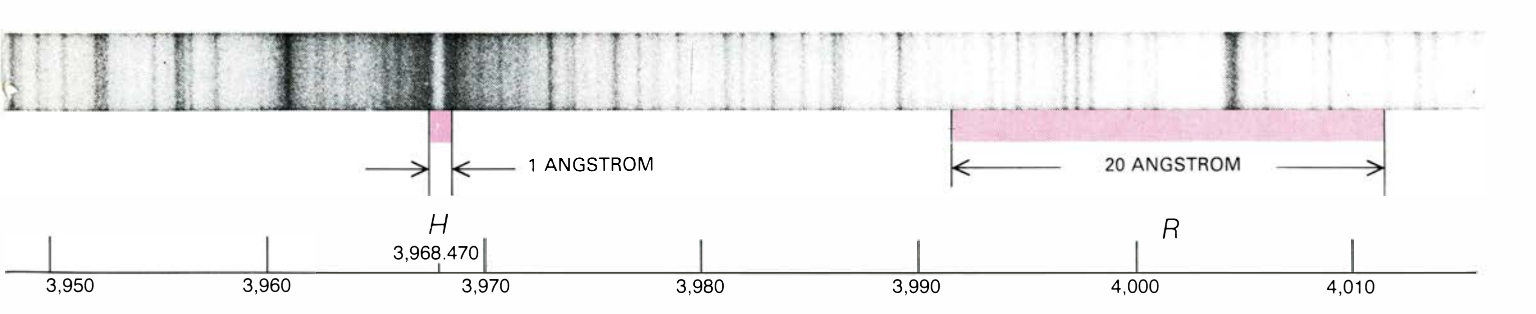
Era razonable esperar que, si se podía encontrar actividad cíclica en las estrellas próximas, podría lograrse una comprensión más honda de los mecanismos cíclicos que operan en nuestra propia estrella. En el Sol, la mejor manera de observar la intensificación de las líneas *H* y *K* del calcio en regiones de alta densidad de flujo magnético es usar los espectroheliogramas, fotografías tomadas en luz monocromática que excluye todas las longitudes de onda excepto las incluidas en las líneas *H* o *K*. En un espectroheliograma de calcio, las regiones magnéticamente activas aparecen como amplias manchas brillantes llamadas "playas", unidas por una red manchada de emisión mucho más débil, que representa la tranquila cromosfera. En las imágenes monocromáticas, las regiones activas aparecen tan brillantes que casi enmascaran completamente las oscuras manchas solares a las cuales están asociadas.

En los espectroheliogramas registrados día a día, y a lo largo de muchos años, en los observatorios solares de todo el mundo se pueden apreciar muchos detalles de interés. Se encuentra así que la fracción de la superficie del Sol ocupada por regiones brillantes y activas varía desde cero, en el mínimo del ciclo solar, hasta un 20 por ciento o más, en el máximo. Si en las estrellas próximas se produjeran variaciones de tal magnitud en la intensidad de sus líneas *H* y *K*, deberían poder observarse con detectores de sensibilidad adecuada.

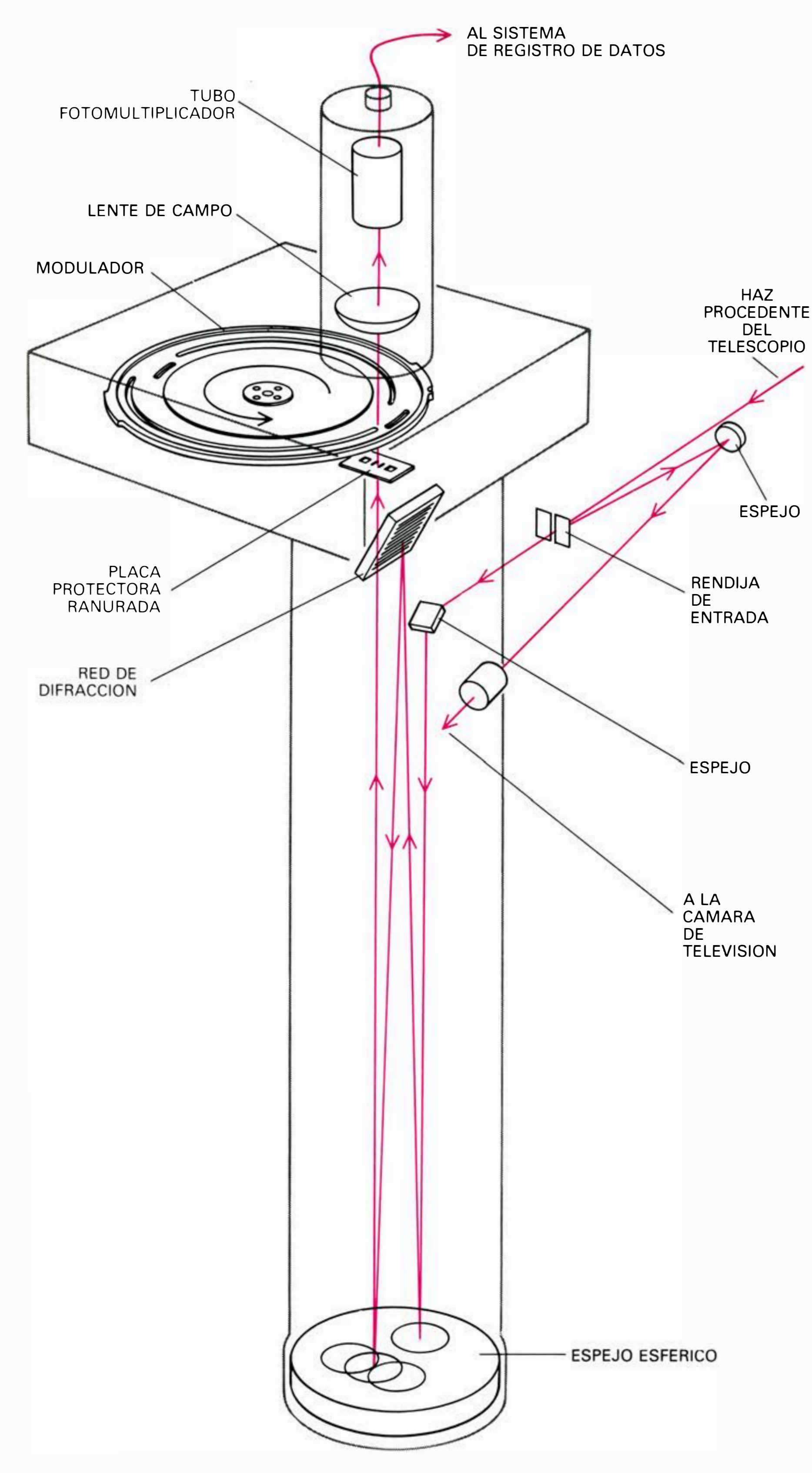
Antes incluso de que se acometieran los primeros esfuerzos por registrar tales variaciones, las líneas de emisión *H* y *K* de muchas estrellas normales habían sido estudiadas intensivamente por uno de nosotros (Wilson) y por otros investigadores. Tales estudios habían puesto de manifiesto, por ejemplo, que la anchura intrínseca de las componentes de emisión *H* y *K* guardaría una estrecha correlación con la luminosidad absoluta de una estrella: cuanto más anchas sean las dos líneas, tanto más brillante será la estrella. La bondad de esta correlación (conocida como efecto Wilson-Bappu) permite suministrar luminosidades estelares intrínsecas razonablemente aproximadas y, por tanto, puede servir de una nueva escala para las distancias estelares. Además, para las estrellas enanas, tales como el Sol, las intensidades de las líneas de emisión *H* y *K* están correlacionadas con la edad de la estrella. Cuanto más débil sea la emisión en el centro de tales líneas, tanto más antigua es la estrella. Los astrofísicos disputan todavía en torno a la explicación teórica de estas dos clases de correlación.

La búsqueda de variaciones temporales en la intensidad de las líneas *H* y *K* no se hizo posible hasta comienzos del decenio de 1960, cuando se instaló en el reflector de 2,5 metros del Monte Wilson un dispositivo de exploración del espectro de alta resolución combinado con un sistema electrónico de alta estabilidad para el recuento de fotones. La nueva instrumentación fue desarrollada en gran medida por Edwin W. Dennison, Guido Münch y J. Beverley Oke, del Instituto de Tecnología de California, y Arthur D. Code, de la Universidad de Wisconsin en Madison. En 1966, uno de nosotros (Wilson) empezó a usar el nuevo equipo en busca de actividad cromosférica variable en una muestra de unas 70 estrellas candidatas. Como parte del método de calibración, y a fin de asegurar la constancia de la medida, se eligió otra muestra de unas 20 estrellas muy antiguas e inactivas que sirvieran de grupo testigo. La primera fase de la investigación concluyó con éxito en 1977.

Desde ese año, ha continuado el estudio con un nuevo instrumento expresamente proyectado para observar la variabilidad cromosférica en las estrellas por uno de nosotros (Vaughan), amparado en un comienzo en el patrocinio de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). El instrumento se halla todavía en fase de perfeccionamiento con la ayuda de la Fundación Nacional de Ciencia. El nuevo instrumento, "fotómetro *H-K*", es considerablemente más estable y algo más sensible que el original; y se usa habitualmente en conjunción con el reflector de 1,5 metros de Monte Wilson. (No se necesita la capacidad de recogida de luz del espejo de 2,5 metros.) Con este aparato, uno de nosotros (Vaughan) y George W. Preston, del Monte Wilson, han ampliado la exploración original sin interrupción; asimismo, la continuidad de la exploración en



"flujo medio *H-K*"; por tal se entiende la suma de los flujos *H* y *K* dividida por la suma de los flujos *V* y *R*. Las dos intensas líneas *H* y *K* portan alrededor del 10 por ciento de la energía radiante total emitida por la cromosfera de la estrella, y, por tanto, constituyen un índice fidedigno de la actividad cromosférica en las estrellas. Desde el año 1968, HD 22049 ha manifestado rápidas fluctuaciones en el flujo *H-K*, pero no ha evidenciado señales de periodicidad.



EL FOTOMETRO *H-K* ideado por Vaughan analiza la luz de las estrellas recogida por el telescopio de 1,5 metros del Monte Wilson. El aparato filtra toda la luz, salvo la que corresponde a 4 estrechas regiones del espectro, como muestra la ilustración inferior precedente. La luz del telescopio se focaliza hacia la rendija de entrada en la parte superior derecha, y continúa a lo largo del camino representado en color. El espejo esférico, al fondo, sirve por un lado para colimar la luz que dirige hacia la red de difracción y, por otro, para refocalizar la luz dispersada por la red, formando así una imagen del espectro. Una sección del espectro cae sobre una placa de protección perforada por dos rendijas que dejan pasar las líneas *H* y *K* y otras dos, más anchas, que permiten el paso de bandas espectrales 20 veces más anchas a cada lado. Una rueda giratoria moduladora deja camino a la luz procedente de una rendija cada vez, luz que llega al tubo fotodetector. Los fotones que atraviesan sucesivamente cada abertura se cuentan por separado y se suman los correspondientes a exposiciones de 30 a 600 segundos para obtener el flujo *H-K* medio.

el futuro parece estar razonablemente asegurada.

El fotómetro *H-K* funciona de la manera siguiente: La radiación estelar recogida por el espejo de 2,5 metros incide sobre una red de difracción que la dispersa formando un espectro. Este se vuelve a focalizar e incide sobre una placa perforada por cuatro rendijas. Dos de las rendijas son muy estrechas y dejan pasar solamente las líneas de emisión *H* y *K;* esas rendijas angostas están situadas entre otras dos aproximadamente 20 veces más anchas. Una rueda giratoria interceptora permite que la radiación atraviese sólo una rendija por vez, y lo haga sucesivamente por todas ellas. De esta manera, un detector único de alta estabilidad registra el flujo de fotones a través de las rendijas. El recuento de fotones para cada rendija se acumula en un contador.

Al final del período de observación (generalmente menos de 10 minutos para cada estrella), se calcula un "flujo medio *H-K*" sumando el número de fotones que atravesaron las rendijas alineadas con las líneas *H* y *K* y dividiendo el total por la suma del flujo de fotones medido en las rendijas más anchas (a cada lado de las más estrechas). La relación de flujos así obtenida es un índice del predominio de regiones activas en la estrella sometida a examen. Tales mediciones son reproducibles con una precisión del 1 o 2 por cien, a pesar de los efectos de la atmósfera terrestre: bruma, nubes y pequeños movimientos de la imagen de la estrella. La precisión ha demostrado ser al mismo tiempo necesaria y suficiente para detectar variaciones de interés en la actividad estelar.

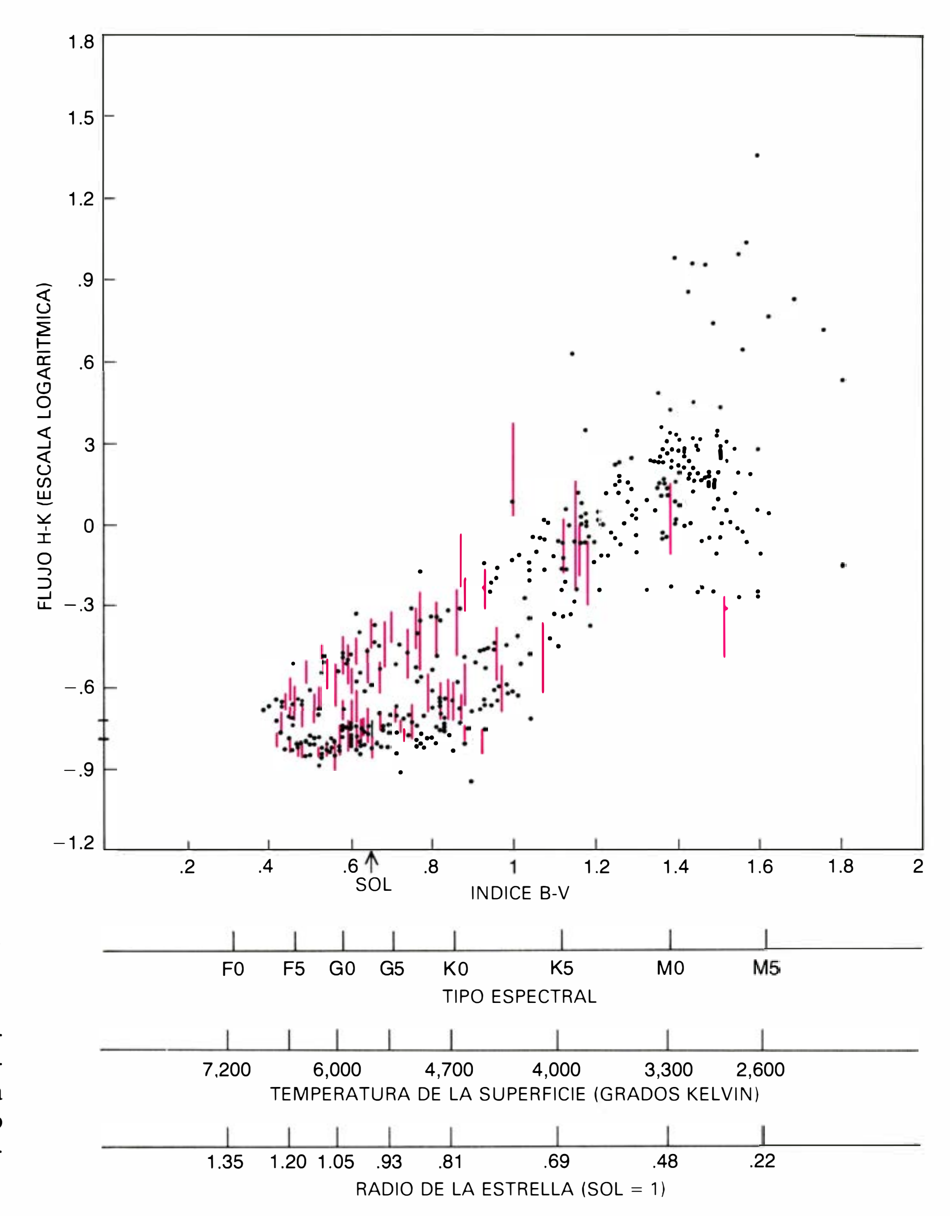
Cuando se examina el registro de las variaciones del flujo *H-K* en una muestra estelar que alcance hasta 1966, se pueden deducir algunas conclusiones acerca de las variaciones cromosféricas en las estrellas de la banda principal. Una porción apreciable presenta un comportamiento cíclico, definido o probable, que puede compararse con el del Sol. Entre las estrellas de masa semejante y similar flujo *H-K*, unas son cíclicas, mientras que otras, dentro de los límites de observación, permanecen constantes. Incluso las estrellas que parecen poseer un flujo medio esencialmente constante a lo largo de cierto número de años pueden presentar una variación substancial en el flujo *H-K,* a veces muy grande, para intervalos de tiempo más cortos. En algunos casos, el flujo cambia notablemente de una noche a la siguiente. Entre las estrellas cíclicas, el intervalo de tiempo entre el flujo mínimo y el máximo presenta una

marcada tendencia a acortarse con respecto al lapso que media entre el máximo y el mínimo, lo mismo que ocurre en el caso del ciclo solar.

Usando todos los datos disponibles, estimamos que quizá la mitad de las estrellas de la banda principal cuya masa no llegara a 1,4 veces la masa solar pueden presentar comportamiento cíclico. La fracción de estrellas cíclicas, sin embargo, podría exceder considerablemente esta estima por dos razones. Algunas de las estrellas de nuestra muestra pueden muy bien tener ciclos mucho más largos que el período de observación de 14 años. Otras estrellas de la muestra que, como el Sol, tienen un flujo de fotones relativamente bajo, no se han observado con la frecuencia suficiente para descartar ciclos de muy pequeña amplitud. Para seguir el flujo *H-K* del Sol, resulta conveniente medir la luz solar reflejada por la Luna. Cincuenta y una mediciones realizadas durante el máximo del último ciclo solar (de febrero de 1968 a octubre de 1970) arrojaron un flujo medio *H-K* para el Sol de 0,178 ± 0,0008 unidades Wilson de flujo. Otra serie de 35 mediciones realizadas durante el mínimo (de enero de 1976 a abril de 1977) dio un valor medio de 0,164 ± 0,0006 unidades. El leve aumento medio de 0,014 unidades (8,5 por ciento) del mínimo solar al máximo solar podría haber pasado desapercibido si se hubiera producido en una estrella para la que se hubieran realizado muchas menos observaciones en el mismo intervalo de tiempo.

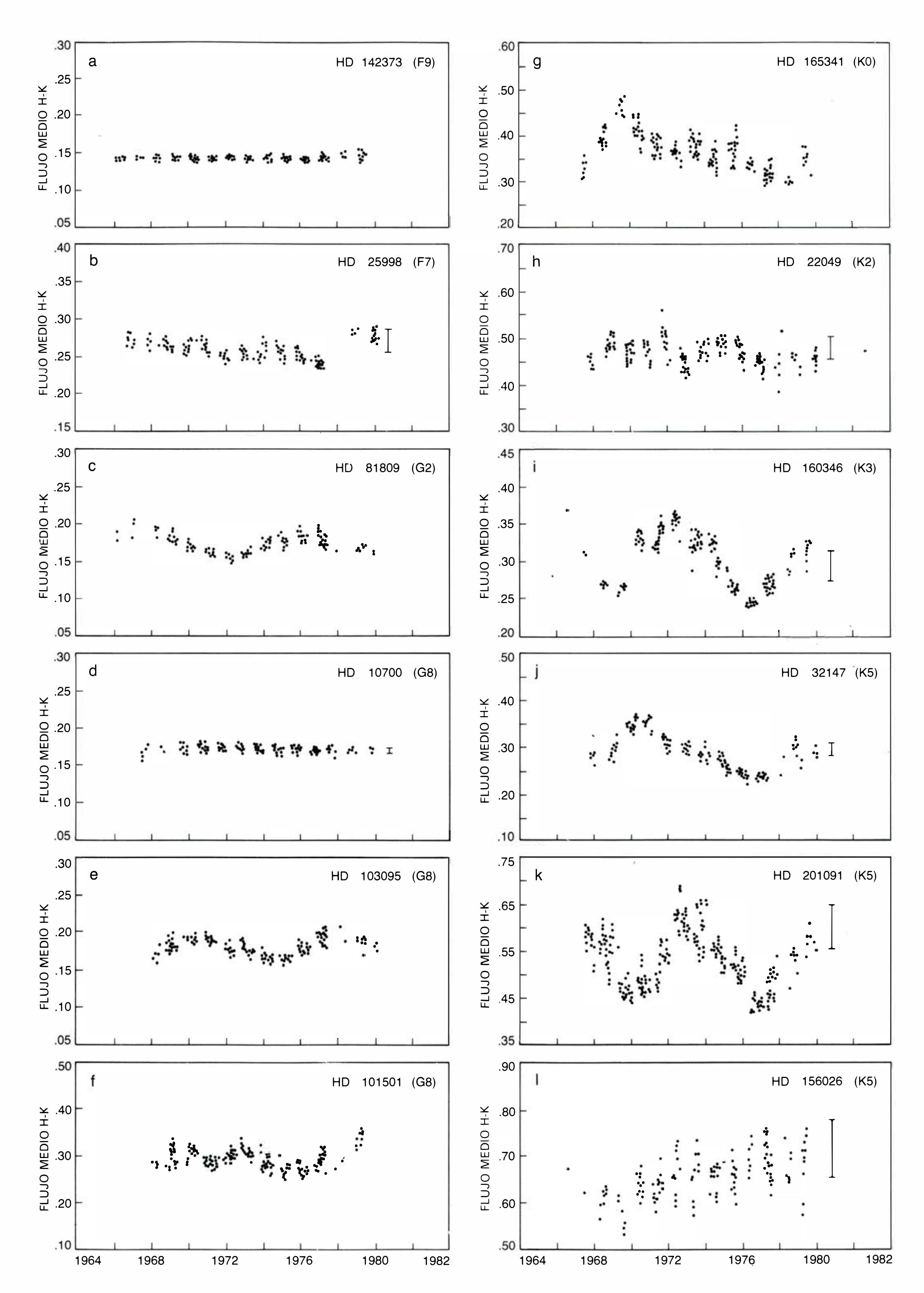
Además, parece probable que, en un período de observación tan corto, de 14 años, no todas las estrellas de la banda principal estarán en modo cíclico, como puede deducirse del mínimo Maunder del Sol. Para las 15 estrellas, más o menos, de nuestra muestra que hasta ahora han presentado ciclos definidos o probables, el período del ciclo varía desde unos siete años hasta al menos el doble. Dicho de otra manera, los ciclos estelares observados comprenden entre sí al ciclo solar de 11 años.

Una manera útil de organizar las observaciones estelares consiste en inscribir el valor de la característica recién observada en función del de alguna característica típica de clasificación, el índice de color por ejemplo. El índice de color representa la diferencia entre las magnitudes de la estrella cuando se mide en dos regiones de longitud de onda escogidas, tales como el azul (*B*, de *blue*) menos la "visible" o amarillo (*V*). De acuerdo con la representación habitual de ese índice, las estrellas más calientes y más azules caen hacia la izquierda, y las más frías y rojas hacia la derecha.



VARIABILIDAD DEL FLUJO *H-K* para 91 estrellas en la exploración de la actividad estelar del Monte Wilson (*barras verticales en color*) comparada con una exploración instantánea del flujo *H-K* de casi 400 estrellas (puntos negros), que suponen una nutrida representación de todas las estrellas de la banda principal semejantes al Sol dentro de 25 parsecs del sistema solar en el hemisferio Norte celeste. El flujo *H-K* aparece en escala logarítmica. Se ha colocado cada estrella en la escala horizontal en razón de su índice *B-V*, clasificación que está correlacionada con el tipo espectral, la temperatura efectiva de la superficie y el radio de la estrella. El índice de flujo *B-V* representa la diferencia entre la magnitud de una estrella medida en la parte azul del espectro (*B*) y en la visible (*V*), o parte amarilla. Las estrellas más calientes y azules caen a la izquierda y las más frías y rojas a la derecha. Las barras verticales indican el máximo intervalo de variación del flujo *H-K* para las 91 estrellas exploradas. La barrita negra señala el intervalo de variación del flujo *H-K* en el Sol, tal como se determina midiendo la luz solar reflejada por la Luna. Un corte vertical en cualquier región a través de la muestra identifica estrellas de masa semejante, pero cuyas edades divergen ampliamente, con las más jóvenes en la parte superior y las más antiguas en la inferior. A pesar de contarse entre las estrellas más antiguas de la muestra, el Sol tiene solamente la mitad de edad que las estrellas más antiguas de nuestra galaxia. En el texto se aborda ese hueco que sugiere una escasez de estrellas de edad mediana. Al aumentar el radio de la estrella decrece su velocidad de rotación.

Cuando se representan los índices de flujo *H-K* de las 91 estrellas de la banda principal en la muestra original en función de sus índices de color, el carácter general es claro: el índice de flujo *H-K* aumenta hacia la derecha a medida que las temperaturas estelares decrecen y las estrellas se hacen más rojas. La inclinación general hacia arriba no significa necesariamente un aumento absoluto en la intensidad de emisión de las líneas *H* y *K;* la mayor parte de ella es producida por efecto de un decrecimiento en la emisión del fondo continuo (el denominador del índice *H-K*) por unidad de superficie estelar y por unidad de intervalo de longitud de onda al decrecer la temperatura fotosférica de la estrella.



a HD 142373 (F9)
b HD 25998 (F7)
c HD 81809 (G2)
d HD 10700 (G8)
e HD 103095 (G8)
f HD 101501 (G8)
g HD 165341 (K0)
h HD 22049 (K2)
i HD 160346 (K3)
j HD 32147 (K5)
k HD 201091 (K5)
l HD 156026 (K5)
FLUJO MEDIO H-K
1964
1968
1972
1976
1980
1982

Característica inesperada de tal representación es que la tendencia hacia arriba del índice de flujo *H-K* se divide en dos ramas que vienen a resultar paralelas. Se trata de una bifurcación no sólo evidente para la muestra de 91 estrellas, sino también para una muestra mucho mayor de 396 estrellas, cifra que constituye una nutrida proporción de estrellas semejantes al Sol en el Hemisferio Norte celeste dentro de una distancia de 25 parsecs (unos 80 años-luz). Las 91 estrellas se representan mediante barras verticales de diversas longitudes según el intervalo de variación observado a lo largo de un período de 11 años; las otras 396 estrellas se representan mediante puntos, porque en la mayoría de los casos se han observado tan sólo una vez [*véase la ilustración de la página 75*].

Desde hace algún tiempo se sabe que la actividad cromosférica de las estrellas de la banda principal decrece lentamente con la edad de la estrella. En la representación del flujo *H-K* respecto al índice de color, un corte vertical en cualquier abscisa a través de los puntos inscritos identifica un grupo de estrellas de masa semejante y diferente edad con las estrellas más jóvenes en la parte superior del corte y las más antiguas en la parte inferior. Sería de esperar que las estrellas presentaran una distribución continua a lo largo de tal corte. Pero se aprecia un hueco claramente discernible, de modo particular hacia la parte izquierda, en el diagrama de los flujos *H-K*. Podría argumentarse que, durante un período de tiempo transcurrido en el pasado, hubiera una interrupción en el nacimiento de nuevas estrellas y, consiguientemente, que hoy día se encuentre un déficit de estrellas en ese margen específico de edades. Aunque ello constituiría una explicación concebible de la bifurcación del diagrama, no la consideramos muy probable. Sospechamos, por contra, que, al llegar a cierta edad, y por razones todavía desconocidas, el mecanismo que da lugar a los fenómenos cromosféricos pasa bruscamente de un modo a otro con una producción muy pequeña de energía.

La precisión de las mediciones en el estudio de los flujos *H-K* es tal que casi todas las desviaciones de 3 por ciento o más deben considerarse intrínsecas a las estrellas y no artificios atribuibles al equipo o al método. De acuerdo con ello, una gran parte de la dispersión observada en nuestros diagramas de flujo *H-K* debe suponerse real y hay que explicarla si ello es posible. Parte de la dispersión puede ser una modulación del flujo, consecuencia de la rotación de la estrella. Tal modulación del flujo *H-K* procedente del Sol se detectó hace más de diez años por astrónomos checos. Se sabe que el campo magnético solar y las actividades cromosféricas que lo acompañan no están distribuidos uniformemente en torno al ecuador solar. La actividad se circunscribe por zonas y, según suele detectarse, es mayor en un lado del Sol que en el otro; esta asimetría persiste con frecuencia, a lo largo de un lapso notable de tiempo (del orden de muchas rotaciones). Al girar el Sol, un observador fijo ve una variación aproximadamente periódica en la emisión cromosférica que coincide con la rotación. Es razonable suponer que otras estrellas mostrarán análogas variaciones de flujo moduladas por la rotación.

El descubrimiento de tal efecto en forma inequívoca requeriría la observación diaria, continua e intensiva de estrellas a lo largo de un período de varias semanas o meses. De hecho, el verano pasado se inició un plan piloto de esta clase por parte de investigadores de la Institución Carnegie de Washington, la Universidad de Harvard, el Observatorio del Pico Sacramente y el Instituto Astronómico de Utrecht, todos ellos trabajando en grupo en el Observatorio del Monte Wilson. Aunque los resultados de este esfuerzo no han tenido tiempo de publicarse por demasiado recientes, resultan muy alentadores.

Parece probable que los períodos de rotación estelar puedan medirse con alta precisión a partir de observaciones de la modulación de los flujos *H-K*, incluso para estrellas cuya rotación no puede detectarse de ninguna otra manera por presentar un giro muy lento. El método clásico para determinar la rotación se ha basado en el ensanchamiento de las líneas de absorción fotosféricas, por el corrimiento Doppler, en la longitud de onda observada de la luz que emana de zonas de la superficie estelar en rotación que se están acercando y alejando. Se trata de un método viable cuando la estrella gira con suficiente rapidez. Los métodos de detección más sensibles hoy en uso requieren que la velocidad ecuatorial de la estrella supere los dos kilómetros por segundo para apreciarse. El ensanchamiento de las líneas observado depende del ángulo que forman la visual del observador y el eje de rotación de la estrella. Cuanto más cerca esté el eje de rotación de la visual del observador, tanto menor será el ensanchamiento observado. Se desconoce, por supuesto, la orientación del eje de rotación de la estrella. El método basado en la modulación del flujo *H-K*, en principio al menos, debería dar valores independientes del ángulo entre el eje de rotación de la estrella y la visual del observador, siempre que tal ángulo sea lo suficientemente grande para que se pueda registrar modulación.

Otra manera de medir los períodos estelares de rotación podría fundarse en la probabilidad de que todas las estrellas semejantes al Sol giren más rápidamente en el ecuador que en la vecindad de los polos. Si las regiones de actividad estelar se parecen a las del Sol, progresando de latitudes altas a bajas en el curso de un ciclo, esto es, de períodos de rotación más largos a más cortos, debería poder deducirse el período de rotación a partir del aumento de velocidad en las variaciones, moduladas por la rotación, del flujo *H-K* observado a lo largo de uno o más ciclos.

La rotación estelar es, en general, demasiado lenta para dar cuenta de los importantes cambios de flujo *H-K* que acontecen en el curso de uno o dos días. Tales variaciones rápidas indican con toda probabilidad la escala de tiem-

VARIACIONES CROMOSFERICAS de una muestra representativa de 12 estrellas, seleccionadas de entre el grupo de 91 estrellas semejantes al Sol sometido a observación sistemática en el Observatorio del Monte Wilson desde 1966. Los puntos representan observaciones individuales del flujo *H-K;* las barras, la amplitud registrada en 1980. Todas las estrellas se hallan a 25 parsecs (unos 80 años-luz), o menos, del sistema solar y corresponden a la banda principal. Se identifica cada estrella por su número en el catálogo de Henry Draper. El tipo espectral de la estrella, que está correlacionado con la temperatura de su superficie, sigue entre paréntesis. La letra que designa el tipo (*F, G, K*) especifica un cierto intervalo de temperaturas, que a su vez se subdivide en 10 niveles por el dígito siguiente (0 hasta 9). (Las relaciones entre el tipo espectral, temperatura, color y radio espectral se muestran en la ilustración anterior.) Se han dispuesto las estrellas en orden decreciente de su temperatura superficial con una excepción: la estrella *a* es ligeramente más fría que la *b*. La estrella *a* se ha puesto a la cabeza del grupo como ejemplo de una estrella sin comportamiento cíclico y escasa variación en su flujo *H-K*. La estrella *b* muestra una lenta disminución seguida de un brusco aumento en 1979 y 1980. La estrella *c* (del mismo tipo espectral que el Sol, *G2*) presenta un ciclo de unos 10 años, muy próximo al del Sol. Las estrellas *d*, *e* y *f*, aunque son del mismo tipo, *G8*, muestran marcadas diferencias de comportamiento. La *e* es una estrella antigua cuya concentración de elementos metálicos es mucho menor que el de las otras estrellas, Sol incluido. La *g* es un ejemplo de una estrella probablemente cíclica, si bien no ha podido observarse a lo largo de un ciclo completo. La estrella *h* muestra variaciones rápidas, pero no un ciclo claro. Las tres siguientes (*i, j, k*) presentan ciclos cortos. La *l* es otra estrella sin perioricidad, aunque revela grandes variaciones.

po característica del crecimiento y la desaparición de grandes regiones activas en la estrella. Nuestras observaciones sugieren que, en muchas estrellas, las variaciones se suceden más rápidamente que en el Sol. Cabe otra posibilidad: mientras que la actividad cromosférica solar es intermitente, algunas estrellas pueden tener cromosferas que están en actividad casi continua. En tales estrellas pueden producirse fulguraciones más frecuentes, y en una escala mayor, que en el Sol. Se trata, empero, de hipótesis provisionales; la luz en este terreno vendrá, exclusivamente, de investigaciones futuras.

Desde hace años, se tenía conciencia de que el estudio de la actividad estelar se beneficiaría grandemente de una profundización, paralela y a largo plazo, en el conocimiento de los flujos *H* y *K* del Sol llevada a cabo por métodos lo más parecido posible a los que se emplean para las observaciones estelares. Tal programa ha sido emprendido desde 1974 por William C. Livingston y O. R. White, del Observatorio Nacional de Kitt Peak. En fecha más cercana se han acometido proyectos semejantes por R. L. Stimets, de la Universidad de Lowell, y por C. Zwaan y sus colaboradores, del Instituto Astronómico de Utrecht. Las observaciones solares de esos investigadores, lo mismo que un experimento controlado bajo condiciones conocidas, producirán con toda seguridad descubrimientos que ayudarán a los investigadores en su labor interpretativa de las observaciones análogas de las estrellas. Aun cuando el Sol sea sólo una estrella, con sus valores fijos de edad, masa y composición química, ha constituido, y debe seguir siendo, la fuente de información más pormenorizada sobre cuantos fenómenos se hallan relacionados con los ciclos de actividad.

Transcurrirá algún tiempo antes de que se pueda adquirir un nivel de conocimiento sobre los ciclos estelares parangonable con lo que se sabe acerca del ciclo solar tras siglos de observación atenta. Lo que falta a los estudios estelares en historia puede compensarse en parte con la posibilidad de tomar múltiples instantáneas de numerosos objetos que se hallan en una fase, composición y estadio de evolución diferentes.

En ese sentido, quizás hayan de transcurrir generaciones antes de que los astrónomos tengan oportunidad de observar el Sol durante una recurrencia del mínimo de Maunder. Varias de las estrellas sometidas a examen en nuestro programa de observación pueden ahora mismo estar pasando por un período de reposo que se corresponda estrechamente con tal mínimo.

Hemos indicado que la actividad cromosférica en las estrellas de la banda principal disminuye a medida que la estrella envejece. Se dan dos explicaciones de esta observación; la más sencilla supone que los campos magnéticos de las estrellas son residuos de los campos magnéticos adquiridos en su nacimiento, cuando los gases preestelares se estaban condensando para formar una protoestrella. Desde este punto de vista, el decrecimento de la actividad cromosférica con la edad revelaría que los campos magnéticos iniciales se están transformando gradualmente en energía mecánica y térmica que, con el tiempo, se pierde en forma de radiación emitida. Desde otro punto de vista, que es el más ampliamente aceptado, el campo magnético de una estrella es generado por una dinamo interna mantenida por la rotación de la estrella. Consecuentemente, la intensidad del campo magnético decrece a medida que la rotación de la estrella se va frenando por la interacción de las partículas ionizadas emitidas por la estrella y las líneas de fuerza del campo magnético de la estrella.

¿Qué sucede con la actividad cromosférica después de que una estrella haya permanecido en la banda principal durante un tiempo suficiente para que su actividad magnética haya disminuido hasta un nivel bajo? Con el tiempo, la estrella agota su hidrógeno combustible, empieza a quemar helio y se reestructura a sí misma, de modo que crecen tanto su radio como su luminosidad; se convierte en una estrella subgigante. A medida que aumenta el radio de la estrella, decrece su velocidad de rotación de acuerdo con la conservación del momento cinético. Podría esperarse, por tanto, que la intensidad del campo magnético de la estrella disminuyese todavía más y su actividad cromosférica cayera a un nivel bajo. Sin embargo, se sabe que muchas subgigantes tienen cromosferas muy activas: sus emisiones *H* y *K* pueden ser substanciales. La curiosa reactivación en las estrellas subgigantes constituye una prueba más de cuán poco sabemos acerca de la física subyacente a la actividad magnética estelar. Hasta ahora no se ha emprendido la búsqueda de ciclos de actividad y modulación rotacional en las subgigantes ni en ninguna otra de las diversas clases de estrellas que quedan fuera de la banda principal. Quede esta fascinante empresa para el futuro.

Pterosaurios

Ni dinosaurios ni aves, estos seres fueron reptiles voladores que perduraron a lo largo de 135 millones de años. Se supone que algunos de ellos, con una envergadura alar de 12 metros, han sido los mayores animales voladores

Wann Langston, Jr.

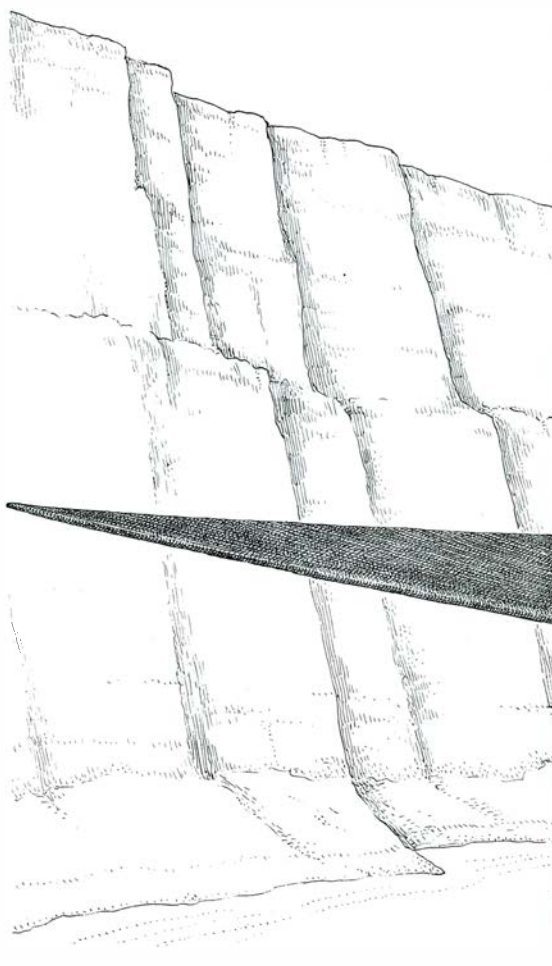
Pocos animales prehistóricos han cautivado tanto la imaginación como los reptiles voladores conocidos por pterosaurios. Aunque extinguidos desde el final de la era Mesozoica, hace de ello 64 millones de años, estos dragones del aire han configurado de manera decisiva la idea que de ese pasado remoto tiene el hombre, una vez que Arthur Conan Doyle los incorporase en *El mundo perdido.* A lo largo de casi dos siglos, los paleontólogos no han hecho sino conjeturar sobre los restos fósiles de los pterosaurios, y es seguro que otros investigadores se han preguntado cómo resolvieron estos reptiles los problemas del vuelo activo. Los aficionados al vuelo en delta tienen su curiosidad justificada, pues los mayores pterosaurios pesaban aproximadamente lo que el piloto de uno de esos artefactos planeadores.

Hasta hace poco se creía que los pterosaurios de una envergadura alar de hasta ocho metros representaban el tamaño máximo alcanzable por los animales voladores. Esta hipótesis se mantuvo hasta que, en 1972, Douglas A. Lawson, alumno por aquel entonces de la Universidad de Texas en Austin, descubriera varios huesos alares procedentes de una especie desconocida de pterosaurio en el Big Bend National Park, en la parte occidental de Texas. Se trataba de unos huesos sorprendentemente grandes. El radio, hueso del antebrazo, se hallaba casi completo. Medía casi 75 centímetros. Desde entonces no se han exhumado más restos de este animal, denominado *Quetzalcoatlus northropi* en honor del dios azteca que tomó la forma de una serpiente emplumada. En otra zona del parque se han encontrado huesos de pterosaurios más pequeños y bastante parecidos. Estos descubrimientos ulteriores permiten una reconstrucción hipotética de *Quetzalcoatlus,* según la cual, alcanzaría una envergadura alar de 11 a 12 metros. Así pues, *Quetzalcoatlus* quizá fuera el animal volador de mayores proporciones de todos los tiempos. Aunque los pterosaurios de Texas se conocen todavía de manera imperfecta, pasaré revista a la información que de ellos se dispone hoy en día. El tema puede abordarse mejor en el contexto de lo que se sabe (o se sospecha) acerca de los pterosaurios en general.

La afirmación menos controvertida en torno a los pterosaurios es su naturaleza reptiliana. Reptiliano es su cráneo, forma de los dientes incluida. Y de reptil son la pelvis y los miembros posteriores. Pese a lo cual, no cabe duda de que en sus adaptaciones al vuelo los pterosaurios se apartaron tanto de los reptiles conocidos popularmente como dinosaurios que en la actualidad ningún investigador los confundiría con ninguno de los dos órdenes de dinosaurios. Pterosaurios y dinosaurios parecen haber evolucionado siguiendo rutas divergentes desde las formas más primitivas de vida reptiliana.

También parece claro que los pterosaurios no dieron lugar, por evolución, a las aves. A este respecto la anatomía reveladora es la del ala. En un pterosaurio, el cuarto dedo de cada extremidad anterior estaba muy alargado; sostenía el borde anterior de una membrana que se extendía desde el flanco del cuerpo hasta el extremo más alejado de ese dedo. Los otros eran cortos y reptilianos, con una aguda garra al final de cada uno. En un ave, es el segundo dedo el principal puntal del ala y, naturalmente, buena parte de la extensión de ésta está compuesta de plumas.

Aunque se han encontrado restos fosilizados de pterosaurios en todos los continentes, con excepción de la Antártida, la mayoría de los pterosaurios fósiles proceden de los yacimientos de creta de la parte occidental de Kansas, de algunos estratos sedimentarios de Inglaterra y, en particular, de la caliza de Solnhofen, en Baviera, una roca de grano fino depositada en una laguna tranquila durante la era Mesozoica y que el hombre ha empleado para litografía durante los últimos siglos. Los primeros fósiles de pterosaurios se encontraron en una cantera de caliza cercana al pueblo bávaro de Eichstätt. Su descubrimiento fue señalado en 1784 por Cosimo Collini, antiguo secretario de Voltaire. Los fósiles incluían poco



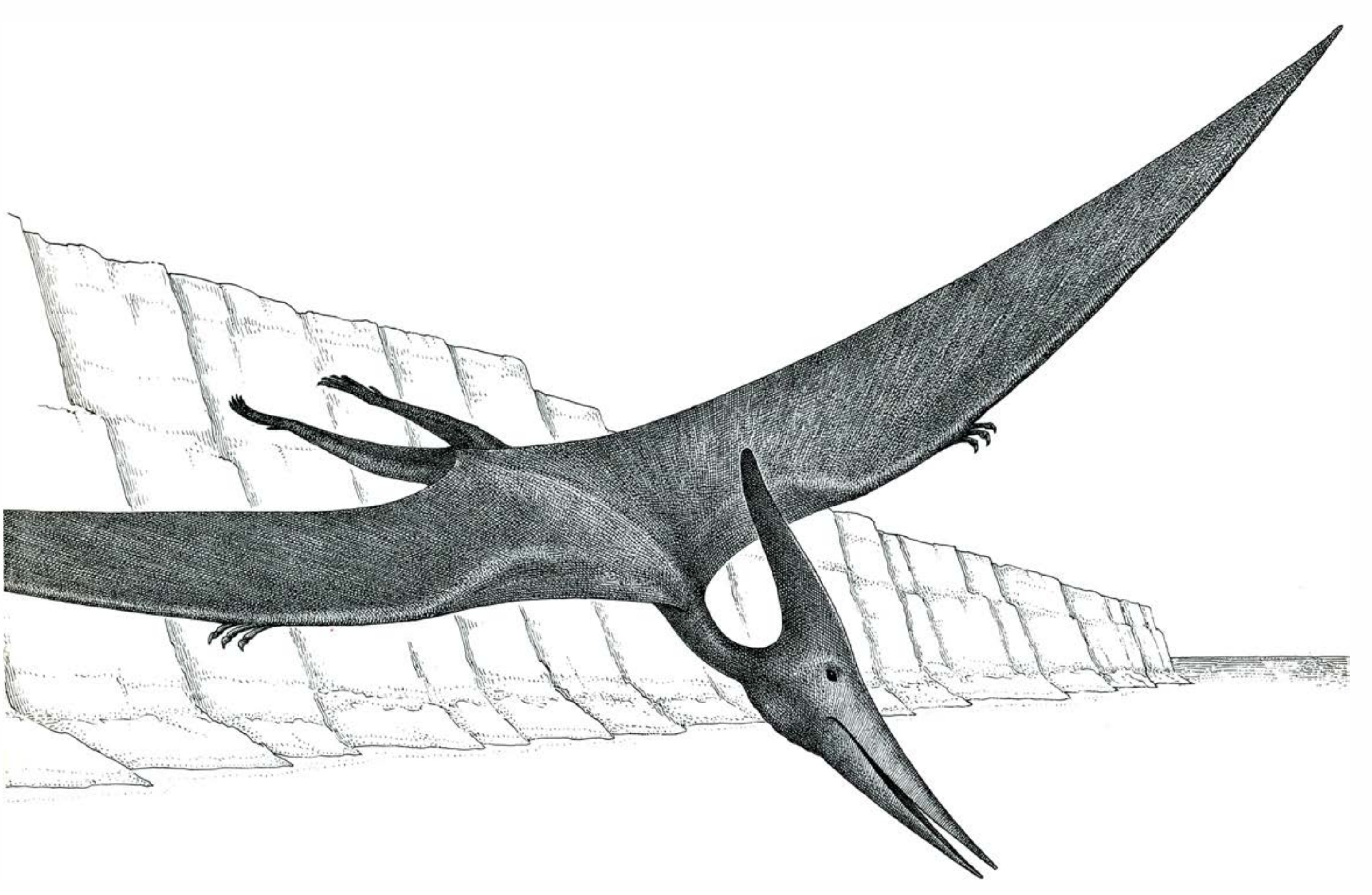
PTERANODON, un pterosaurio del período Cretácico, que vivió desde hace 135 millones de años hasta hace 64 millones de años, dibujado en vuelo.

más que una estructura en forma de ala, lo que no impidió que Collini la confundiera con un mamífero anfibio. Conceptos erróneos similares habían de perdurar; de hecho, incluso después de que Georges Cuvier, el maestro de la anatomía comparada del siglo XIX, afirmará que lo que él denominaba "pterodáctilo" (literalmente, dedo alar) era un reptil volador, algunos de sus contemporáneos siguieron considerando a los pterosaurios murciélagos, aves o marsupiales voladores. En 1830, el zoólogo alemán Johann Wagler relacionó los pterosaurios con reptiles marinos extinguidos. Los situaba entre los mamíferos y las aves. Su reconstrucción mostraba un animal nadador con alas similares a las aletas de los pájaros bobos y pies semejantes a timones.

La opinión general moderna de que los pterosaurios son reptiles voladores se estableció al finalizar el siglo pasado, y en la actualidad la mayoría de los investigadores consideran que estos animales constituyen un orden de reptiles, el de los Pterosaurios. Se conocen aproximadamente 85 especies, distribuidas en dos subórdenes. El suborden más antiguo, los Ranforrincoideos, aparece súbitamente en el registro fósil en calizas triásicas de 200 millones de años de antigüedad, en Italia septentrional. Las características distintivas de los Ranforrincoideos son varias. Cortos de cara y cuello. En el ala, la muñeca era breve y el cuarto dedo largo. El animal tenía una larga cola. Entre los Ranforrincoideos se encontraban algunos de los pterosaurios más pequeños, aproximadamente del tamaño de un gorrión.

El otro suborden, el de los Pterodactiloideos, aparece igualmente de modo abrupto a finales del Jurásico, unos 50 millones de años después. Se distinguían por una larga cara y un cuello largo y curvado. Tanto la muñeca como el cuarto dedo contribuían de manera notable a la longitud del ala; algunas especies eran excepcionalmente grandes. *Quetzalcoatlus* era un pterodactiloideo. Los Pterodactiloideos tenían cola apenas insinuada. La aparición súbita de ambos subórdenes de pterosaurios sin ningún antecedente aparente es bastante típica del registro fósil, y pone de manifiesto la naturaleza aleatoria de los descubrimientos en paleontología.

Los pterosaurios se parecían tanto a las aves como a los murciélagos en lo concerniente a estructura y proporciones generales. No debiera sorprendernos. El diseño de cualquier animal vertebrado que vuele se halla sujeto a restricciones aerodinámicas. Un examen más detallado revela tanto semejanzas como diferencias. En primer lugar, los pterosaurios tenían huesos huecos, lo que sin duda representaba un ahorro de peso. También las aves muestran esa estructura ósea, si bien suelen reforzarse con tirantes internos. En los pterosaurios, al igual que en las aves, la fusión de varios huesos limitaba la flexibilidad del tronco. Las articulaciones móviles eran pocas, en particular en las alas y en los tobillos, lugares donde las tensiones sobre el cuerpo eran grandes. La larga cola de los Ranforrincoideos se mantenía rígida mediante expansiones grandes y superpuestas de las vértebras, y otras expansiones vertebrales limitaban la capaci-



El animal ha utilizado la corriente de aire que asciende a lo largo de un acantilado para ganar altitud y posteriormente ha planeado en dirección al mar en busca de peces. Se cree que batía las alas lentamente y con baja frecuencia. La cresta podría actuar a modo de superficie de control del aire, compensando así la falta de cola. La envergadura de un gran *Pteranodon* era de hasta siete metros, lo que hacía de él uno de los mayores pterosaurios.

dad de movimiento lateral y de rotación del cuello del gran pterodáctilo *Pteranodon.*

Muchos pterosaurios tenían una cresta sobre el cráneo. La de *Pteranodon* era especialmente pronunciada, duplicando en algunas especies la longitud de la cabeza. La función de la cresta constituye un enigma. Ciertamente debía tener algún efecto sobre el aerodinamismo del animal; experimentos con modelos de la cabeza en un túnel de viento sugieren que cuando ésta se giraba en ángulo recto a la dirección del vuelo del animal, aumentaba la resistencia al avance. Así pues, la cresta pudo haber sido un freno de aire para el aterrizaje. También pudo servir de timón para compensar la falta de cola, o quizás ayudaba a equilibrar el largo pico, permitiendo una reducción de la masa de los músculos del cuello.

Sin embargo, parece que otros grandes pterosaurios se las arreglaron sin una cresta. Es más, el entrelazamiento de las vértebras del cuello en *Pteranodon* debía impedir que el animal rotara la cabeza en ángulos de importancia. Finalmente, algunos cráneos de *Pteranodon* carecen de cresta. Si esta ausencia es natural y no refleja simplemente la imperfecta preservación de los fósiles, la cresta pudo haber sido una carac-



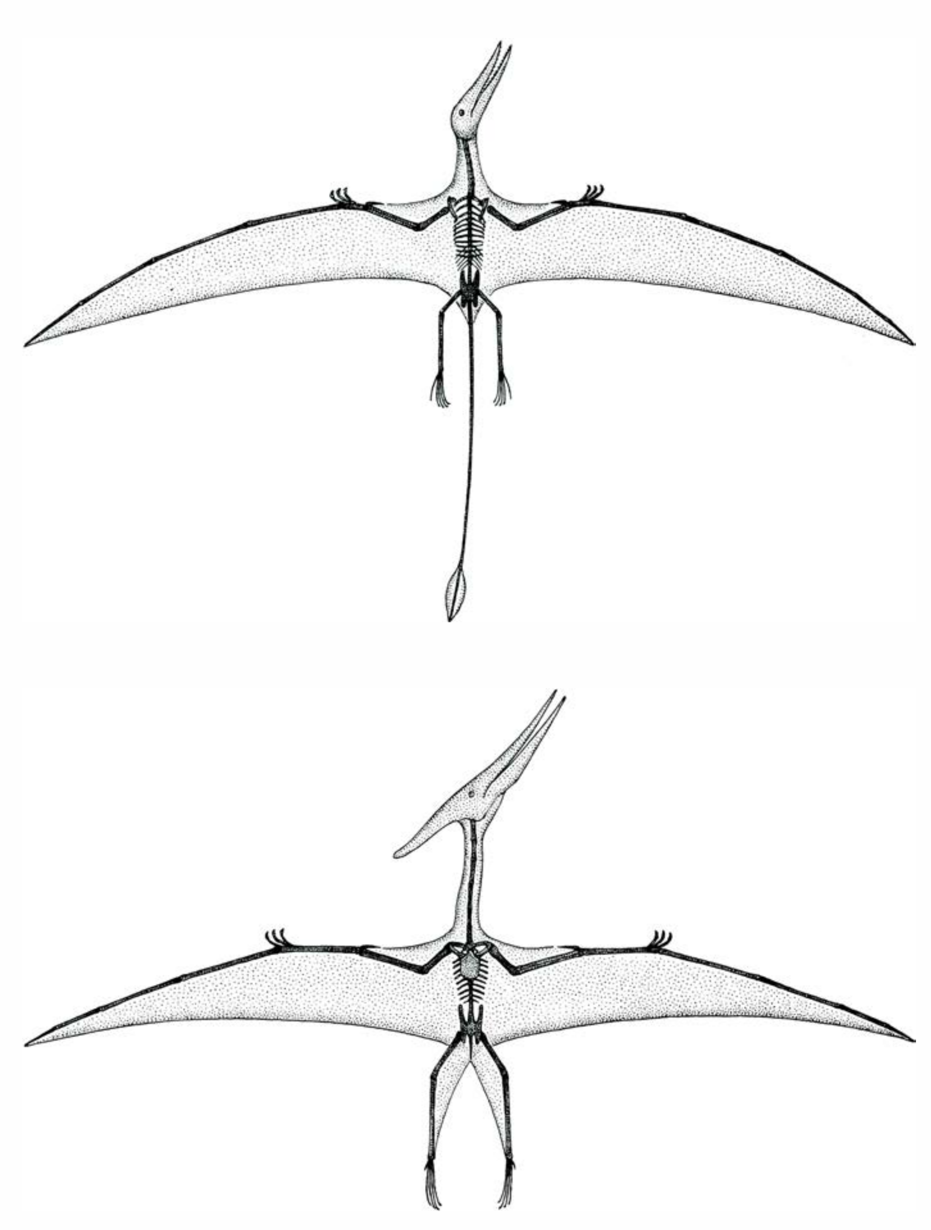
RESTOS FOSILES del pterosaurio *Pterodactylus elegans*, del tamaño de un gorrión, descubiertos en una caliza de Solnhofen, Alemania Occidental. La caliza se solidificó a partir del sedimento depositado en el fondo de una laguna hace unos 150 millones de años, en el período Jurásico tardío. La postura del esqueleto es anormal. Por ejemplo, las alas se extienden hacia la izquierda y después se pliegan bajo la caja torácica. Aparentemente, el cadáver del animal se secó sobre una playa antes de ser arrastrado al lugar en el que finalmente se hundió. Además de pterosaurios fosilizados, la caliza de Solnhofen ha proporcionado fósiles de pequeños dinosaurios y de la primera ave conocida, *Archaeopteryx*. Esta piedra se ha utilizado durante siglos para la impresión litográfica. El ejemplar de *Pterodactylus elegans* que aquí aparece ilustrado forma parte de la colección del American Museum of Natural History.

terística sexual. En tal caso, no puede aventurarse si adornaba al macho o a la hembra.

La adaptación evolutiva más notable de la estructura de los pterosaurios fue, naturalmente, el ala. En su diseño fundamental se parecía al miembro anterior de un tetrápodo, es decir, un animal que marcha a cuatro patas. Aquí, sin embargo, el larguísimo cuarto dedo se había convertido en un largo y delgado mástil alar. El ala se fijaba al tronco del pterosaurio mediante una robusta cintura escapular, un anillo óseo compuesto por la escápula u omóplato, el esternón y un tercer hueso, el coracoides. En los pterosaurios más pequeños, la cintura escapular se parecía bastante a la de un ave. La diferencia principal yacía en la ausencia de un cuarto hueso, la espoleta o fúrcula. Sin embargo, la escápula y el coracoides se hallaban típicamente fusionados, y en las especies mayores la escápula ya no se encontraba embutida libremente en los músculos situados a lo largo del flanco del animal, posición típica de la escápula de todos los tetrápodos, excepción hecha de las tortugas. En cambio, la escápula era una vara robusta dirigida hacia dentro. En el plano medio del cuerpo, la parte superior de la escápula se insertaba en el notario, una barra ósea exclusiva de los mayores pterodáctilos. El notario derivaba de la fusión de varias vértebras.

Muchos fósiles de pterosaurios que descansan sobre sedimentos de grano fino incluyen impresiones de la membrana alar, que se extendía desde la punta del cuarto dedo hasta el lado del tronco, al menos en los Ranforrincoideos. La membrana se hallaba reforzada internamente mediante largas y delgadas fibras de colágeno, dispuestas apretadamente, que sin duda evitaban que la parte externa del ala se doblara. Otras fibras se disponían hacia el borde de escape del ala para amortiguar el aleteo de la membrana alar. Las fibras, ligeramente arqueadas en dirección proa-popa, contribuían a la combadura, o convexidad de sentido ascendente, de la superficie de sustentación del pterosaurio. El cuarto dedo se extendía merced a un tendón largo y delgado que discurría desde un músculo de la parte interna del ala (homólogo del brazo de un tetrápodo) hasta una excrecencia ósea, parecida a un codo, del primer segmento del cuarto dedo.

Completando la superficie del ala se extendía hacia delante una membrana triangular desde la muñeca hasta la base del cuello. El triángulo se sostenía en la muñeca por una innovación exclusiva de los pterosaurios, el hueso pteroides, que, evidentemente, correspondía al lugar de fijación de un tendón y un músculo que mantenían tenso el triángulo membranoso y reforzaban al ala situada delante. A partir de ejemplares bien conservados se sabe que algunos ranforrincoideos tenían una halda vertical de piel al final de la cola. Obviamente, se trataba de algún tipo de timón que aumentaba la capacidad de maniobra del animal en vuelo. También pudo servir en el agua si los Ranforrincoideos eran nadadores.



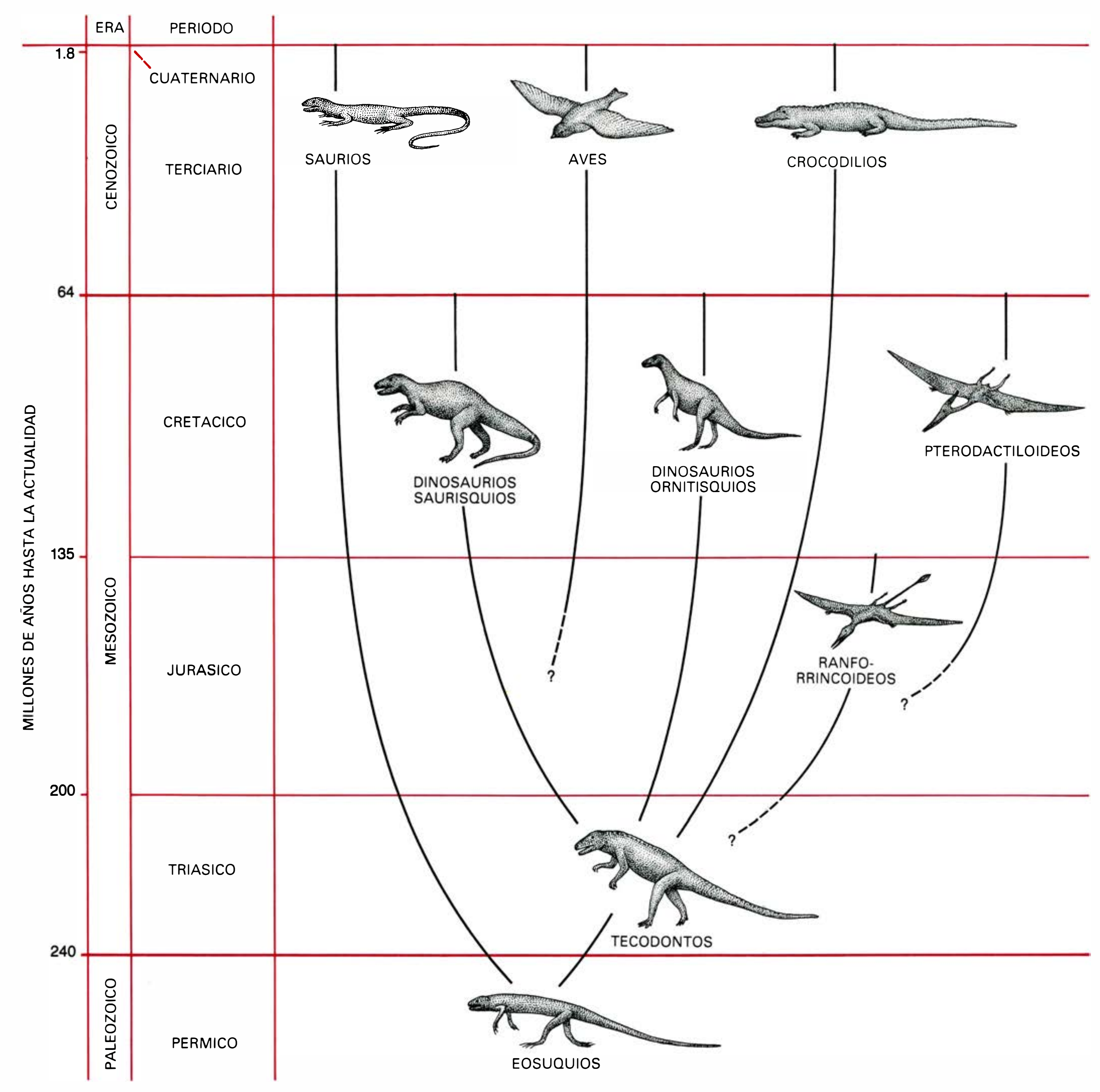
COMPARACION DE DOS SUBORDENES del orden Pterosaurios. Los Ranforrincoideos (*arriba*) tenían una envergadura alar que iba de 0,4 a 2,2 metros. La cara y el cuello eran cortos, la cola larga. Las extremidades posteriores tenía cinco largos dedos. Los Pterodactiloideos (*abajo*) poseían una envergadura de hasta 12 metros. La cara era larga, el cuello curvado y apenas tenían cola ni quinto dedo posterior.

Otros tres aspectos de la anatomía de los pterosaurios merecen mención aparte. El primero es la mano pterosauria o, mejor, los tres dedos de la mano que sobresalían del ala. Si los pterosaurios marchaban a cuatro patas, la mano pudo servirles para agarrar. Pero ahí están los gorilas, que andan con los dedos doblados hacia la palma de la mano; en otras palabras, andan sobre sus nudillos. Los pterosaurios quizá hacían algo similar. O tal vez fueran bípedos. En cualquier caso, cuando el pterosaurio andaba mantenía plegado el cuarto dedo, que no le entorpecía, mediante una articulación situada en su base. La articulación permitía que el cuarto dedo, y con él el ala, se dispusiera hacia arriba a lo largo del costado del animal.

El segundo aspecto notable de la anatomía de los pterosaurios es su cere-

bro. En este sentido resulta esclarecedor un análisis de moldes endocraneales. Los moldes se forman cuando la cavidad craneal de un esqueleto se llena de sedimento durante su fosilización. Por esta razón indican las características superficiales del cerebro. El mejor ejemplo de molde endocraneal de un pterosaurio quizás es el que se descubrió en rocas jurásicas de Inglaterra septentrional a finales del siglo XIX. El espécimen mide sólo 25 milímetros de longitud; aún así, deja ver que el cerebelo era sustancialmente mayor en relación con el tamaño del animal que en los reptiles que no vuelan. De hecho, los lóbulos floculares del cerebelo eran mayores de lo que lo son en las aves actuales de tamaño similar. Ello sugiere un elevado nivel de coordinación muscular. Más específicamente, sugiere maniobrabilidad en el vuelo, en el despegue y en el aterrizaje.

Que los bulbos olfativos del cerebro fueran pequeños revela un sentido del olfato pobre. Los pterosaurios, pues, no confiaban en el olfato para la caza. En cambio, los lóbulos ópticos estaban bien desarrollados. De ahí que la capacidad visual del animal fuera buena, y la aprovechaban, sin duda, para la caza y la navegación. Además, probablemente eran activos durante el día. En su conjunto, el cociente de encefalización de los pterosaurios (la relación entre el volumen o peso de su cerebro y los del cerebro de un reptil terrestre del mismo tamaño) era relativamente grande. Ello indica que el cerebro de los



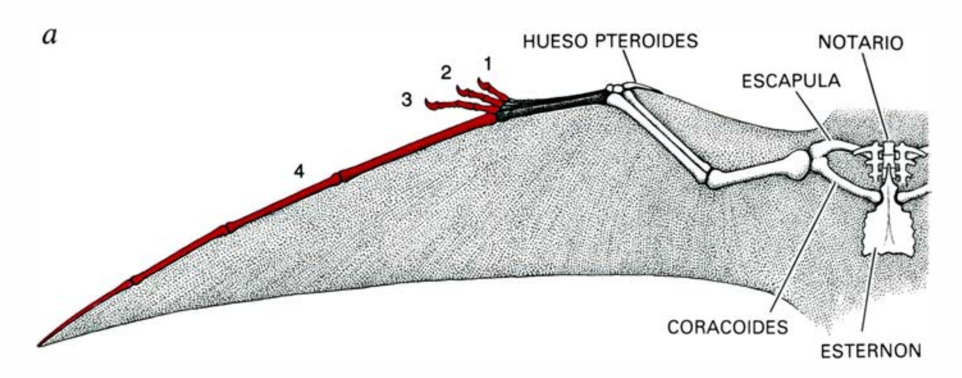
LOS PTEROSAURIOS SURGIERON por evolución en la primera parte de la era Mesozoica. Su aparición, unos 20 millones de años después de la de los primeros dinosaurios, precedió a la de las aves más primitivas en unos 50 millones de años. Se ha emitido la hipótesis de que los precursores de los pterosaurios (de las aves y de los dos órdenes de dinosaurios, los Ornitisquios y los Saurisquios) fueron los reptiles denominados Tecodontos, que a su vez surgieron de los reptiles primitivos, parecidos a lagartos, que se han llamado Eosuquios. Entre los Pterosaurios, los Ranforrincoideos aparecieron por vez primera unos 50 millones de años antes que los Pterodactiloideos. Los últimos pterodáctilos se extinguieron con los dinosaurios, hace 64 millones de años.

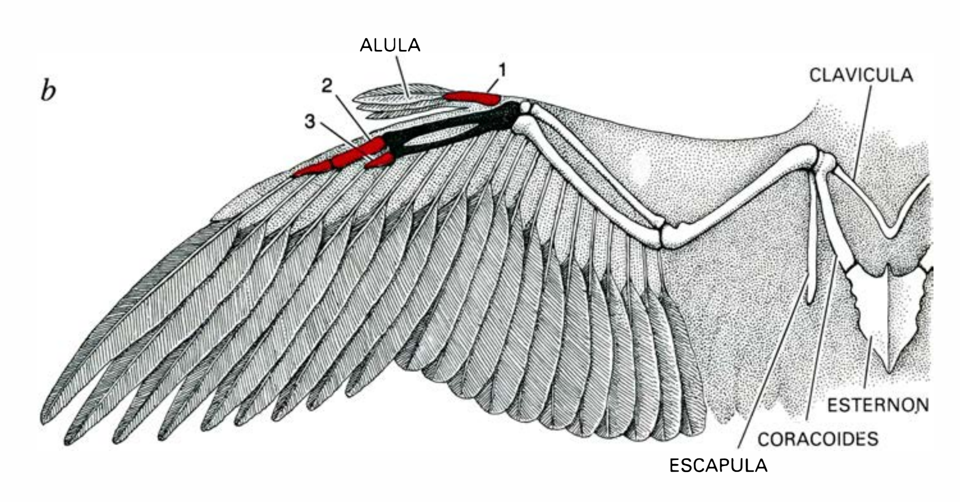
pterosaurios era grande para el cerebro de un reptil, pero que todavía no había alcanzado el tamaño relativo conseguido por el cerebro de las aves.

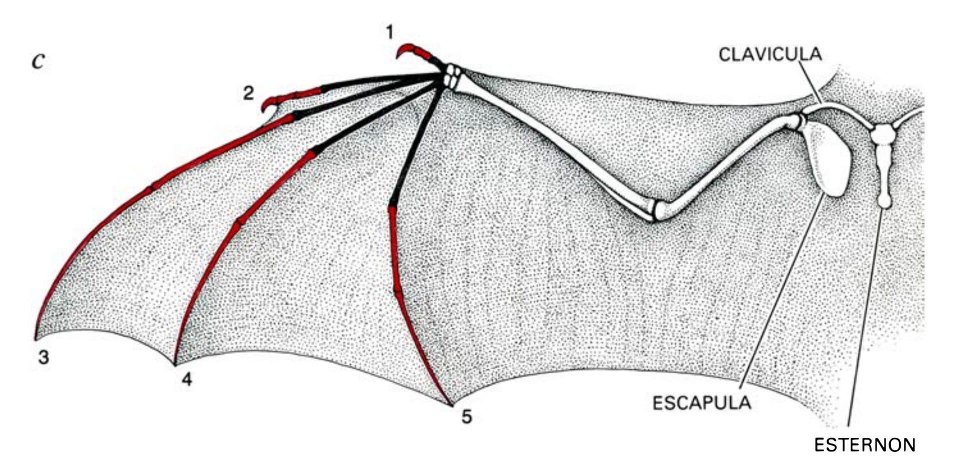
El tercer aspecto notable de la anatomía de los pterosaurios es la piel. Aunque los reptiles se hallan recubiertos típicamente por escamas y los mamíferos por pelo, una y otra vez se ha sugerido que los pterosaurios pudieron haber tenido una capa pilosa. El razonamiento parte de la hipótesis avanzada por T. H. Huxley, hace más de un siglo, de que un vertebrado volador, como un pterosaurio, debió haber sido un animal de sangre caliente. Después de todo, el vuelo supone una elevada tasa metabólica, lo que a su vez implica que el animal ha de mantener una temperatura interna elevada. Un manto de pelo proporcionaría aislamiento frente a la pérdida de calor corporal. También impondría un perfil aerodinámico al cuerpo, reduciendo así su resistencia al avance en vuelo. En el año 1971, A. G. Sharov, un zoólogo ruso, presentó las primeras pruebas claras de que este razonamiento era correcto. Había descubierto, en el Kazakistán, el esqueleto fósil de un ranforrincoideo del tamaño de una paloma, *Sordes pilosus.* El fósil se hallaba arropado por un material fósil similar a pelos "largos, densos y relativamente gruesos". A Sharov le parecía que todo el cuerpo (a excepción de la cola) se hallaba, efectivamente, cubierto de pelo.

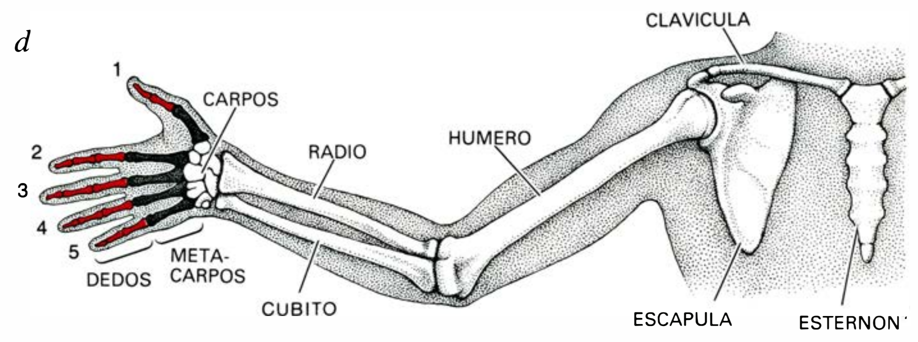
Lo que sabemos del pterosaurio gigante de Texas occidental, *Quetzalcoatlus*, proviene principalmente de dos grupos de fósiles. El primer grupo está constituido por fragmentos del ala de *Quetzalcoatlus northropi.* No se han encontrado restos de otras partes del cuerpo; es evidente que el ala del animal se separó del cuerpo antes del enterramiento. El segundo grupo de fósiles está formado por los huesos dispersos de, al menos, una docena de animales más pequeños. Todos ellos se encontraron en una misma zona, donde parece que murieron en el transcurso de un corto período de tiempo, quizá de sólo unos cuantos años.

Los lugares en los que se encontraron los dos grupos de fósiles están separados unos 50 kilómetros, de modo que no puede establecerse que todos los fósiles representen una población única. Tampoco puede demostrarse que todos los animales vivieran exactamente en la misma época. No obstante, los huesos mayores y los menores apenas podrían distinguirse unos de otros si no fuera







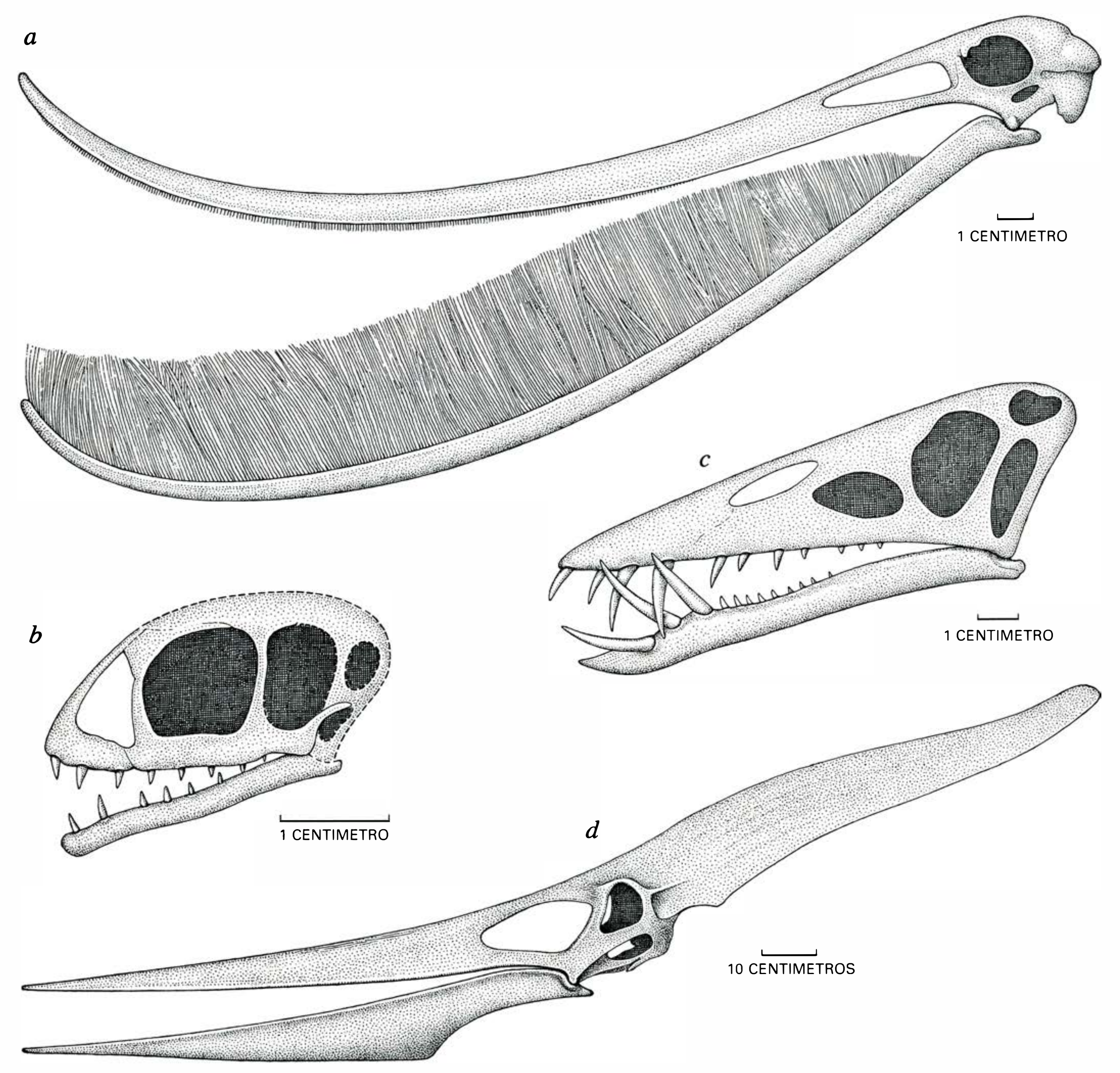


ALAS de un pterosaurio (*a*), un ave (*b*) y un murciélago (*c*); se trata de variaciones evolutivas sobre un miembro anterior adecuado para un animal terrestre que se desplazaba sobre cuatro patas. Las variaciones son características: en el pterosaurio, el dedo que sostiene el ala es el cuarto; en el ave es, sobre todo, el segundo, y en el murciélago son los dedos segundo al quinto. En todos los animales el ala se halla fijada al tronco mediante la cintura escapular, un anillo de huesos. La cintura de los pterodáctilos mayores es peculiar porque la escápula, u omóplato, se gira hacia dentro y se apoya sobre el notario, un hueso exclusivo de los pterosaurios, situado en el plano medio del cuerpo. El notario está compuesto por varias vértebras soldadas entre sí. En *d* se ha representado la extremidad homóloga del hombre, el brazo.

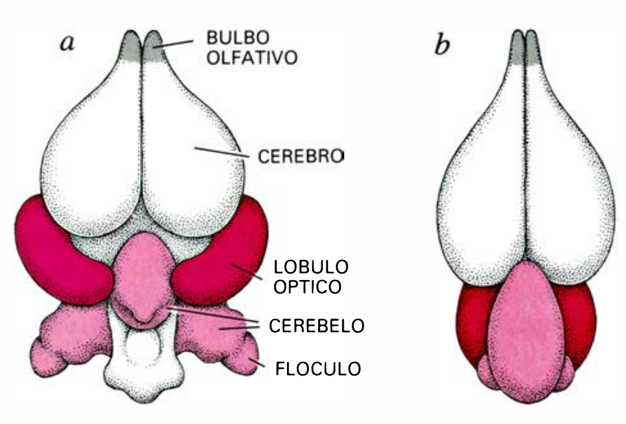
por la disparidad de tamaño. Por ello, podría considerarse que los huesos más pequeños representan ejemplares inmaturos de *Quetzalcoatlus northropi*. A la espera de nuevos descubrimientos que puedan zanjar definitivamente la cuestión, los huesos menores se han clasificado en la jerga taxonómica como representantes de *Quetzalcoatlus* sp., una especie indeterminada.

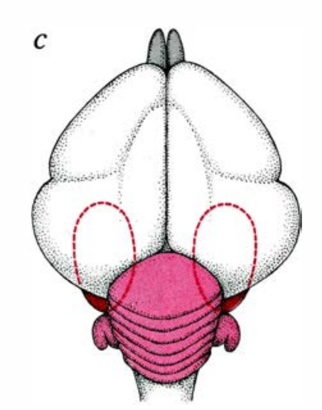
Una vértebra de pterosaurio encontrada en la década de 1940 en Jordania guarda relación con este problema por su parecido con las vértebras del cuello de *Quetzalcoatlus* sp. La vértebra, larga y delgada, confundió al principio a los paleontólogos, que la tomaron por un hueso del ala. Representaba claramente un animal mayor que cualquier pterosaurio de los conocidos en aquella época. Consecuentemente, el género se denominó *Titanopteryx*. El caso es que la vértebra encontrada en Jordania es casi lo bastante grande como para corresponder a *Q. northropi*. Por otra parte, el fósil de Jordania es más viejo que los fósiles de Texas. Por el momento, *Titanopteryx* y *Quetzalcoatlus* pueden considerarse distintos. Si descubrimientos futuros demuestran que son la misma especie, las normas internacionales de nomenclatura zoológica estipulan que *Titanopteryx* debe sustituir a *Quetzalcoatlus* como nombre para el pterosaurio de Texas.

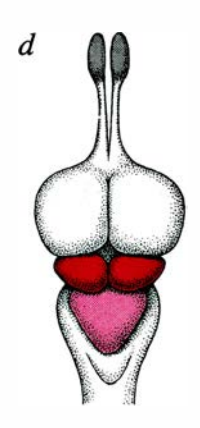
Las estimas preliminares del tamaño de *Quetzalcoatlus northropi* se basaban en comparaciones entre los huesos alares de este animal y las alas de algunas especies de pterosaurios considerablemente más pequeñas. Mediante este método se infirió que la envergadura alar de *Q. northropi* oscilaba entre 11 y 21 metros. Extrapolaciones a partir de dos pterosaurios grandes, *Quetzalcoatlus* sp. y *Pteranodon,* precisaron la estima en 15,5 metros.

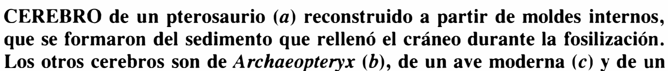


CRANEOS de cuatro pterosaurios, indicativos de sus distintos regímenes alimentarios. *Pterodaustro* (*a*) tenía dientes parecidos a las ballenas: aptos para filtrar plancton del agua del mar. *Anurognathus* (*b*), un pterosaurio diminuto, tenía dientes en forma de púas; pudo alimentarse de insectos. *Dorygnathus* (*c*) era dentado y *Pteranodon* (*d*) desdentado, aunque parece que ambos comían peces, pues en su caja torácica se han encontrado peces fósiles.









CEREBRO de un pterosaurio (*a*) reconstruido a partir de moldes internos, que se formaron del sedimento que rellenó el cráneo durante la fosilización. Los otros cerebros son de *Archaeopteryx* (*b*), de un ave moderna (*c*) y de un reptil moderno, el caimán (*d*). Todos se ven desde arriba. En el pterosaurio, los lóbulos ópticos (indicadores de la visión) y el cerebelo (indicador de la coordinación muscular) están bien desarrollados para el cerebro de un reptil.

Sin embargo, los ingenieros aeronáuticos se apresuraron a señalar que un pterosaurio con la forma de *Pteranodon* y una envergadura de 15,5 metros podría pesar hasta 136 kilogramos. En tal caso, le habría faltado potencia muscular para mantener un vuelo sostenido mediante el batir de las alas. Además, la fuerza de los huesos alares habría sido quizás insuficiente para soportar las tensiones a que debieron estar sometidas las alas. Desde luego, *Quetzalcoatlus northropi* no tenía exactamente las mismas proporciones que *Ptenarodon.* Aun así, un animal con una envergadura de 15,5 metros se habría encontrado probablemente en los límites de ingeniería de una máquina voladora compuesta por músculos, tendones y delicados huesos huecos, o más allá de tales límites.

Por desgracia, sigue siendo insegura la longitud precisa del ala de *Quetzalcoatlus northropi.* Se sabe, empero, que el hueso metacarpiano del cuarto dedo era relativamente más largo en *Quetzalcoatlus* que en *Pteranodon,* y que algunos de los demás huesos de este dedo eran sustancialmente más cortos. Estas diferencias sugieren un cálculo ajustado por el cual la envergadura alar de *Quetzalcoatlus* sp. resulta ser de no menos de 5,5 metros, y la de *Q. northropi* de 11 a 12 metros. Un animal así pudo haber pesado 86 kilogramos. A pesar del reciente descubrimiento en Argentina de un buitre extinguido, cuya envergadura se estima que era de más de siete metros, *Q. northropi* sigue siendo todavía el mayor animal volador del que se tiene noticia.

Pocas son las aserciones en torno al modo de vida de los pterosaurios que se hallen bien sustentadas. La dificultad estriba en que los vertebrados raramente quedan enterrados en el lugar exacto donde vivían. El cadáver se halla expuesto a los carroñeros, a la descomposición, a la meteorización y al transporte por agua corriente. Por ejemplo, los *Pteranodon* de Kansas se encuentran en localidades que en el Mesozoico se hallaban por lo menos 160 kilómetros mar adentro. Con casi toda seguridad, los animales murieron al caer en el agua, lejos de casa. Los pterosaurios de Solnhofen se encuentran en una roca que se depositó en forma de sedimento calizo en lagunas. La postura de muchos de estos esqueletos sugiere que los cadáveres se secaron sobre una playa y luego flotaron hasta el lugar donde se hundieron.

Los esfuerzos por imaginar cómo iniciaban el vuelo han llevado a sugerir que saltaban o se dejaban caer desde lo alto de un acantilado, se lanzaban desde su descansadero en un árbol o incluso se elevaban hasta alcanzar una brisa desde la cresta de una ola. Cada hipótesis plantea ciertas dificultades. La primera se basa en parte en la afirmación de que los pies posteriores de los pterosaurios se parecían a los de un murciélago, y por ello podían servir como garfios de los que el animal se colgaba de un farallón, preparándose para el vuelo. Un estudio reciente de Kevin Padian, de la Universidad de California en Berkeley, sugiere no obstante que las patas posteriores y los pies de los pterosaurios se acercaban mucho más a los de las aves y los dinosaurios de lo que hasta ahora solía suponerse. No se acepta que estos animales fueran en realidad escaladores de acantilados.

En cuanto a la segunda hipótesis, parece poco probable que los grandes pterosaurios pudieran aterrizar sobre los árboles sin dañar sus alas. Sin embargo, sí es concebible que los pterosaurios treparan por ellos. Las pezuñas del macho cabrío parecen indicar que el animal sólo es capaz de andar, cuando en realidad los machos cabríos trepan hasta las ramas bajas de los árboles pegándose a ellos con otras partes de sus extremidades. La tercera hipótesis demanda olas altas que canalicen las corrientes ascendentes que el animal habría empleado para planear. Sin embargo, el viento que levantara tales olas bien pudiera haber sido demasiado fuerte para que el animal, una vez en el aire, controlase su vuelo.

La puesta en escena de los pterosaurios de Texas presenta un problema especial a la hora de imaginar de qué manera el animal abandonaba el suelo. Los fósiles se hallaron en arcillas y areniscas depositadas en un amplio cono aluvial a unos 400 kilómetros tierra adentro desde la costa marina más cercana en aquel tiempo. Aunque hacia el oeste se extendían tierras altas, no hay ningún indicio en la geología de la región de que en las cercanías hubiera ninguna montaña o farallón. Cabe presumir, pues, que *Quetzalcoatlus* vivió sobre un terreno relativamente llano y bajo. Aquí, como es costumbre en los buitres, habría de esperar cada mañana hasta que el sol calentara el suelo y se desarrollaran fuertes corrientes térmicas ascendentes. En los pterosaurios mayores, la musculatura que accionaba el ala no era extraordinariamente robusta; poseían largas y débiles extremidades posteriores. Considerando el conjunto, no resulta verosímil que *Quetzalcoatlus* corriera utilizando sus miembros posteriores y batiera enérgicamente las alas. Con todo, si el animal podía mantenerse erguido sobre sus patas posteriores y captar la brisa apropiada, un único batimiento de las alas y un salto con las patas quizá bastaran para el despegue.

El aterrizaje debía ser menos problemático. Evidentemente, la velocidad

del aire a la que un pterosaurio en vuelo frenaba bruscamente significaba menos para un pterosaurio que para un ave del mismo peso. De ahí que el pterosaurio pudiera descender con suavidad sobre sus extremidades posteriores. El cuerpo del animal debía instalarse lentamente entre sus manos al plegar las alas. ¿Cómo se desplazaba sobre el suelo? Algunos zoólogos sospechan que los cuartos traseros de *Pteranodon* eran demasiado débiles para sostener el cuerpo. Sugieren, alternativamente, que el animal descansaba sobre su pecho, que suponen bien acolchado. En este caso, el animal se habría arrastrado e impulsado a la manera de algunos murciélagos. Padian sugiere, por el contrario, que los pterosaurios tenían una postura bípeda. Finalmente, algunas pistas fósiles de una arenisca jurásica de Arizona se atribuyen (quizás erróneamente) a un pterosaurio. Fueron realizadas por un animal que andaba a cuatro patas.

La mecánica del vuelo de los pterosaurios es asimismo un tema cargado de incertidumbres. Pero a la vez ilustra el modo de vida que pudieron haber tenido los pterosaurios. Cherrie D. Bramwell y George R. Whitfield, de la Universidad de Reading, han llevado a término un detallado examen de *Pteranodon* considerado como máquina voladora. Llegan a la conclusión de que un *Pteranodon* con una envergadura de 6,9 metros y un peso de 16,6 kilogramos sólo pudo haber volado en vientos entre ligeros y moderados. Un viento ligero es aquel que sopla de 13 a 20 kilómetros por hora; levanta papeles sueltos del suelo y hace que una bandera se separe de su mástil en un tercio de su longitud. Las propiedades aerodinámicas del pterosaurio en un vuelo planeado le darían sólo una ligera tendencia a hundirse. De ese modo podría elevarse fácilmente en una corriente ascendente. Sin embargo, todos estos cálculos se basan en un modelo de *Pteranodon* en el que la membrana alar se extiende desde la punta del cuarto dedo hasta el tobillo de la extremidad posterior. El registro fósil no da pruebas de que ello sea así; de hecho, se sabe que en algunos pterosaurios el ala se estrechaba en la base.

En general, la relación entre la superficie del ala y el peso total del pterosaurio indica que el ala soportaba menos peso por unidad de superficie que en un ave de tamaño similar. De ello podría deducirse que el vuelo de los pterosaurios era lento pero maniobrable. Sin embargo, los pterosaurios carecían de muchas de las superficies de control de que disponen las aves. Carecían, por ejemplo, de un estabilizador horizontal efectivo, misión que desempeña la cola del ave. Por tanto, los pterosaurios debieron ser menos capaces de maniobrar en vuelo de lo que lo es un ave. Los grandes pterodáctilos probablemente batían con lentitud sus alas en el despegue y para recuperar el nivel del vuelo cuando era necesario. Una vez en el aire, un animal como *Pteranodon* debía poder permanecer en vuelo por largos períodos, elevándose con las corrientes ascendentes cerca de los accidentes del terreno, como acantilados, y después dejándose llevar sobre tierra o agua por las corrientes de aire suaves.

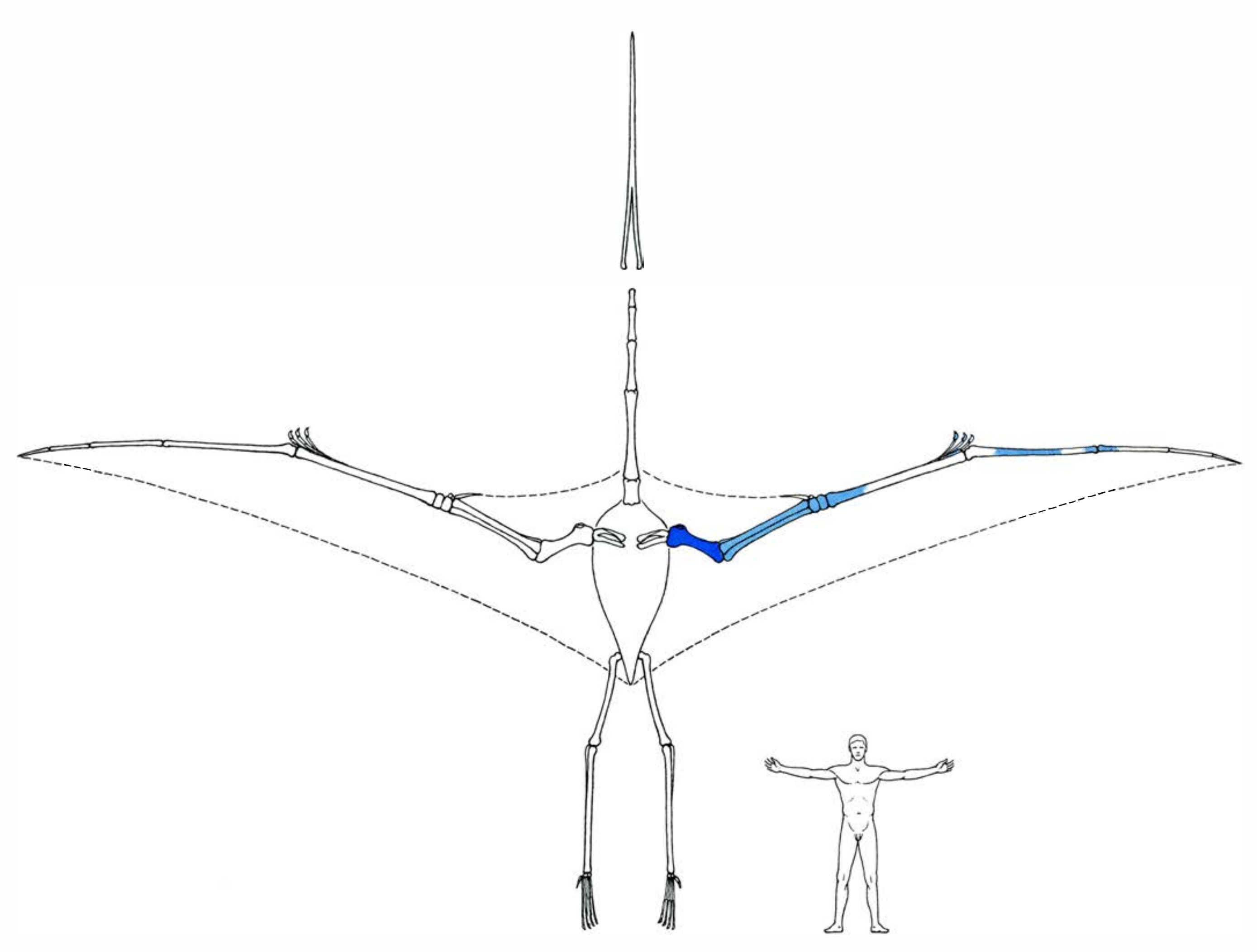
Los pterosaurios menores eran probablemente voladores más activos, capaces de batir con más energía sus alas. Sin embargo, debieron ser más lentos que un ave de tamaño similar. En 1956, Erich von Holst, del Instituto Max Planck de Fisiología del Comportamiento, en Seewiesen, Alemania Occidental, construyó un modelo de ranforrincoideo con papel de arroz, madera de balsa y aluminio. Movido por tiras de caucho, el modelo batió sus alas arriba y abajo unas 40 veces, con una frecuencia de batimiento de dos a tres veces por segundo, hasta aterrizar suavemente. El vuelo se calificó de elegante: en absoluto parecido, por ejemplo, al vuelo espasmódico de un murciélago. Sin embargo, las alas del modelo eran más amplias que las de un pterosaurio, de manera que es improbable que el pterosaurio hubiera volado de la misma forma. Esfuerzos más recientes para duplicar el vuelo de los pterosaurios han sido decepcionantes.

El contenido fosilizado del estómago de los pterosaurios (o, al menos, los fósiles que se han encontrado en el interior de la caja torácica fosilizada) muestra que varias especies de pterosaurios comían peces. No está claro cómo los capturaban. El esqueleto de los pterosaurios probablemente no hubiera soportado las tensiones de bucear en el agua, y el cuerpo de estos animales los hace tan adecuados para el movimiento bajo el agua como si de un periódico abierto se tratara.

Quizá *Pteranodon* y algunos otros pterodáctilos pescaran al vuelo. Un *Pteranodon* deslizándose lentamente justo por encima de la superficie de una masa de agua podría sumergir su pico en el agua para extraer un pez. (El es-



PRUEBA DE LA PRESENCIA de pelo en el cuerpo de los pterosaurios. Se obtuvo en 1971, en el Kazakistán, Unión Soviética, donde se encontraron estas impresiones fósiles del pterosaurio *Sordes pilosus*, del tamaño de una paloma. Las marcas en forma de pelo cubrían, parece, casi todo el cuerpo.



***QUETZALCOATLUS NORTHROPI*, cuyos restos se descubrieron en 1971 en Texas; este pterosaurio pudo haber sido el mayor animal volador que haya habitado la Tierra. Sólo se encontraron huesos alares incompletos (*color claro*). Sin embargo, se calcula que la envergadura alar del animal debió alcanzar de 11 a 12 metros. El húmero (*color oscuro*) es el hueso que aparece en la parte superior de la fotografía de la página siguiente. Dibujo de T. Prentiss.**

trecho perfil del pico encontraría poca resistencia.) E inmediatamente se tragaría la pieza cobrada, o bien lo transportaría en su saco gular, una bolsa parecida a la de un pelícano. Se han encontrado restos fósiles de peces en una impresión fósil del saco. Algunos investigadores creen que los pterosaurios podían posarse sobre el agua y pescar desde una plataforma flotante.

En aquellos casos en los que no se ha descubierto el contenido estomacal, la mejor indicación del régimen alimentario de un animal suele ser su dentición y la estructura de su mandíbula. A partir de tales pruebas se ha sugerido que *Anurognathus,* un diminuto pterosaurio de corta cara y dientes en forma de púas, comía insectos. Es discutible si el animal tenía suficiente capacidad de maniobra para cazar insectos al vuelo. Otras especies tenían regímenes alimentarios claramente distintos. La mandíbula inferior de *Pterodaustro* soportaba cientos de dientes, comparables con las barbas de una ballena, morfología que supone una posible dieta de plancton. *Pteranodon,* un piscívoro, carecía de dientes.

Quetzalcoatlus quizá también comiera peces, pero sigue sin comprenderse dónde los podía capturar. No hay pruebas a favor de la existencia de grandes masas de agua permanentes cerca de los lugares donde vivía este pterosaurio. Además, las rocas en las que se encontraron los fósiles de *Quetzalcoatlus* están casi desprovistas de restos de peces. Sin embargo, las rocas presentan muchas trazas de animales excavadores. Además, la presencia de masas de troncos fosilizados en la zona sugiere inundaciones periódicas. Quizás un monzón fuera responsable de ello. Todo ello plantea la posibilidad de que *Quetzalcoatlus* empleara su fino pico para escudriñar en busca de moluscos o artrópodos que vivieran en cuencas de inundación someras. Ello significaría, naturalmente, que *Quetzalcoatlus* se alimentaba en tierra.

Puesto que los pterosaurios eran reptiles, puede conjeturarse su reproducción ovípara. De hecho, hace más de un siglo se descubrieron en Inglaterra supuestos huevos de pterosaurio. Por otra parte, la pelvis de un pterosaurio difiere de las de las aves. En particular, el canal para los huevos debía ser relativamente estrecho. El problema se complicaría por la sencilla condición de que el huevo de un pterosaurio habría de requerir cierto tamaño notable para acomodar las alas plegadas del animal en desarrollo. Asimismo, parece probable que la madre se viera obligada a volar en busca de alimento durante la gestación, a pesar de su peso adicional. Quizá las crías eran paridas vivas en un estadio de desarrollo inmaturo; en este caso, habría que contar con una crianza prolongada. Masas de hojas fósiles de coníferas encontradas con los restos de *Quetzalcoatlus* sp. podrían ser restos de los nidos.

A partir de la distribución geográfica de los fósiles y de la edad de las rocas



COMPARACION DE LOS HUESOS de *Quetzalcoatlus northropi* con los de unos pterosaurios similares, pero más pequeños, encontrados en las inmediaciones, y que permitió la reconstrucción de *Quetzalcoatlus*. El hueso superior es el húmero izquierdo de *Q. northropi;* tiene 0,54 metros de longitud. El hueso de abajo es el húmero derecho de un animal denominado *Quetzalcoatlus* sp. porque se carece de pruebas de que fuera el juvenil de la especie *Q. northropi*. El hueso tiene 0,24 metros de longitud. Los fósiles de *Quetzalcoatlus* sp. sugieren que la envergadura del animal menor era de seis metros.

en que éstos se encuentran puede suponerse que los pterosaurios aparecieron por primera vez en lo que ahora es Europa meridional. De allí se extendieron por Asia, Africa, India y Norteamérica hacia finales del Jurásico, y alcanzaron Sudamérica y Australia en el Cretácico. Su dispersión se vería facilitada por la relativa falta de barreras geográficas. En aquellos tiempos, las actuales masas continentales de la Tierra se hallaban más o menos en contacto. Posteriormente los fondos oceánicos se expandieron y los continentes se separaron. Las poblaciones de pterosaurios quedaron aisladas y la evolución acentuó su diversidad. En varios continentes surgieron especies grandes.

Al aproximarse el final del Mesozoico, las masas continentales de la Tierra se acercaban ya a las posiciones que tienen en la actualidad. Fue una época de amplias inundaciones en las regiones bajas de los continentes. La superficie terrestre total se redujo temporalmente a quizá la mitad de lo que es en la actualidad. Por ejemplo, un amplio canal marino interior dividía Norteamérica en dos, de norte a sur. Fue entonces cuando los pterosaurios alcanzaron su mayor distribución: se extendían al norte y al sur del ecuador hasta latitudes de unos 70 grados. Sin embargo, se estaban levantando las cordilleras, y cuando la expansión de los fondos oceánicos amainó, en el mismo final del Cretácico, las cuencas oceánicas se hicieron más profundas. Por ello, el nivel del mar descendió, y las tierras inundadas volvieron a emerger. Estos cambios alteraron profundamente los climas y los hábitats a los que los pterosaurios se hallaban habituados. La extinción redujo gradualmente su número hasta que sólo quedó *Quetzalcoatlus*. Después, también éste desapareció.

La extinción de los pterosaurios coincidió con la de muchas formas de plancton marino, moluscos y reptiles. En tierra desaparecieron los dinosaurios. De hecho, ningún animal de más de unos 23 kilogramos de peso sobrevivió al Cretácico. Las razones de la extinción en masa se discuten acaloradamente. Las primeras ideas han dejado paso a explicaciones que a veces invocan catástrofes tales como explosiones volcánicas o la radiación letal de una supernova cerca del sistema solar. La hipótesis más reciente es que un asteroide colisionó con la Tierra hacia finales del Mesozoico y dio origen a una nube de polvo que rodeó el planeta durante varios años, amortiguando la luz del sol. Las formas de vida que sobrevivieron en tierra eran pequeñas o de sangre caliente, o ambas cosas a la vez. Se supone que los mamíferos subsistieron comiendo semillas. En favor de esta hipótesis cuenta el hecho de que en algunos lugares el final del Mesozoico está marcado en el registro geológico por una delgada capa de arcilla en la que la concentración de elementos químicos exóticos, como el iridio, es curiosamente elevada.

Las consecuencias de la colisión de un asteroide con la Tierra habrían seguramente decidido el destino del último pterosaurio. Pero también es verosímil otra explicación, menos espectacular. El registro fósil muestra claramente que los pterosaurios declinaban ya durante los últimos millones de años del Cretácico. Además, se cree que los cambios climáticos del final del Cretácico implicaron un descenso de las temperaturas del planeta y un aumento de la variación estacional del tiempo atmosférico. Es decir, la Tierra debía estar azotada por tormentas. Los vientos tempestuosos de las tormentas habrían sido desastrosos para animales como *Pteranodon*, que se hallaban adaptados a volar a vela en vientos suaves y constantes. Su única posibilidad de supervivencia parece que habría sido mejorar sus capacidades aerodinámicas, reduciendo su tamaño. Los restos de *Quetzalcoatlus* sugieren que los pterosaurios, por el contrario, evolucionaron en sentido opuesto.

Un telescopio de neutrinos en las profundidades marinas

Los fenómenos de alta energía como las supernovas y las estrellas dobles emisoras de rayos X pueden emitir un torrente de neutrinos. Sensores protegidos por cinco kilómetros de agua podrían detectar las partículas

John G. Learned y David Eichler

Virtualmente, todo cuanto saben los astrónomos sobre los objetos exteriores al sistema solar se basa en la detección de fotones o cuantos de radiación electromagnética. Sin embargo, hay otra forma de radiación que impregna el universo y puede incluso dominarlo: los neutrinos. Sin carga eléctrica y con masa despreciable, el neutrino es una partícula elemental que raramente interacciona con otras partículas, tan raramente que un neutrino puede atravesar la totalidad del universo, incluso cruzando agregaciones substanciales de materia, sin ser absorbido e incluso sin ser desviado. Y los neutrinos que no han sido absorbidos o desviados llevan consigo información acerca del lugar donde se originaron y pueden escapar de regiones del universo donde la luz y otras clases de radiación electromagnética quedan encerradas por la materia. Por tanto, la detección de neutrinos cósmicos podría suministrar nueva información sobre múltiples fenómenos astrofísicos.

La misma desgana para interaccionar con la materia que da al neutrino su largo alcance explica esa extraordinaria dificultad por detectarlo. La mayoría de los neutrinos que llegan a la Tierra la atraviesan sin obstáculo y sin dejar rastro de su paso. No hay aparato que pueda detectar los neutrinos, a menos que tenga una masa extremadamente grande y esté suficientemente protegido de los efectos perturbadores de otras partículas. Una gran masa es sinónimo de elevado número de nucleones (neutrones y protones), y cuanto más masivo el detector, tanto mayor la probabilidad de que uno de sus nucleones interaccione con un neutrino.

Hace algunos años, un grupo de físicos elevó una ambiciosa propuesta para detectar los neutrinos cósmicos y terrestres "domesticando" la masa del océano. Llamado DUMAND (*d*eep *un*derwater *m*uon *a*nd *n*eutrino *d*etector, "detector de muones y neutrones instalado a gran profundidad marina"), la propuesta requería situar un conjunto de sensores de luz en el fondo oceánico, a unos cinco kilómetros de profundidad. El medio detector es la propia agua del mar: cuando un neutrino interacciona con una partícula en un átomo de agua del mar, da lugar a una cascada de partículas cargadas eléctricamente y a un relámpago de luz que registrarán los sensores. Los cinco kilómetros de agua del mar suprayacente a los sensores protegerán a éstos de los efectos perjudiciales de otras partículas de alta energía que caen como una lluvia desde la atmósfera.

El neutrino tiene una rica historia intelectual. En 1931, se introdujo dicha partícula como entidad hipotética para explicar una pequeña cantidad de energía que parecía evanecerse en la desintegración radiactiva de ciertos núcleos atómicos. Wolfgang Pauli propuso que la energía que faltaba se la llevaba consigo una partícula no observada, a la que Enrico Fermi denominó más tarde neutrino ("neutro pequeñito"). Hubo que esperar hasta 1956 para poder detectar la partícula, lo que consiguieron Frederick Reines y Clyde L. Cowan, Jr. El neutrino se considera ahora como un miembro de la pequeña familia de partículas elementales conocidas como leptones, que no parecen tener tamaño mensurable ni estructura. Las otras especies de leptones son el muon, el electrón y la partícula tau. Hay tres clases de neutrinos, una asociada con el electrón (llamado neutrino del electrón), otra asociada con el muon (llamado neutrino del muon) y otra asociada con la partícula tau (neutrino de tau). Para cada clase de neutrino, existe el antineutrino correspondiente.

Se acostumbra emplear los neutrinos creados en los grandes aceleradores de partículas para sondear los masivos miembros de la otra clase importante de partículas: los hadrones (que incluyen el protón, el neutrón, el pion y el kaon), constituidos, al parecer, por los llamados quarks. Los experimentos con aceleradores de partículas, en los que los neutrinos son difundidos por hadrones, han revelado muchas cosas acerca de la estructura de la materia. De la flexibilidad del neutrino habla el que pueda utilizarse para explorar objetos tan pequeños como los quarks y para investigar objetos a distancias astronómicas. Los microscopios de neutrinos, sin embargo, han avanzado mucho más que los telescopios de neutrinos.

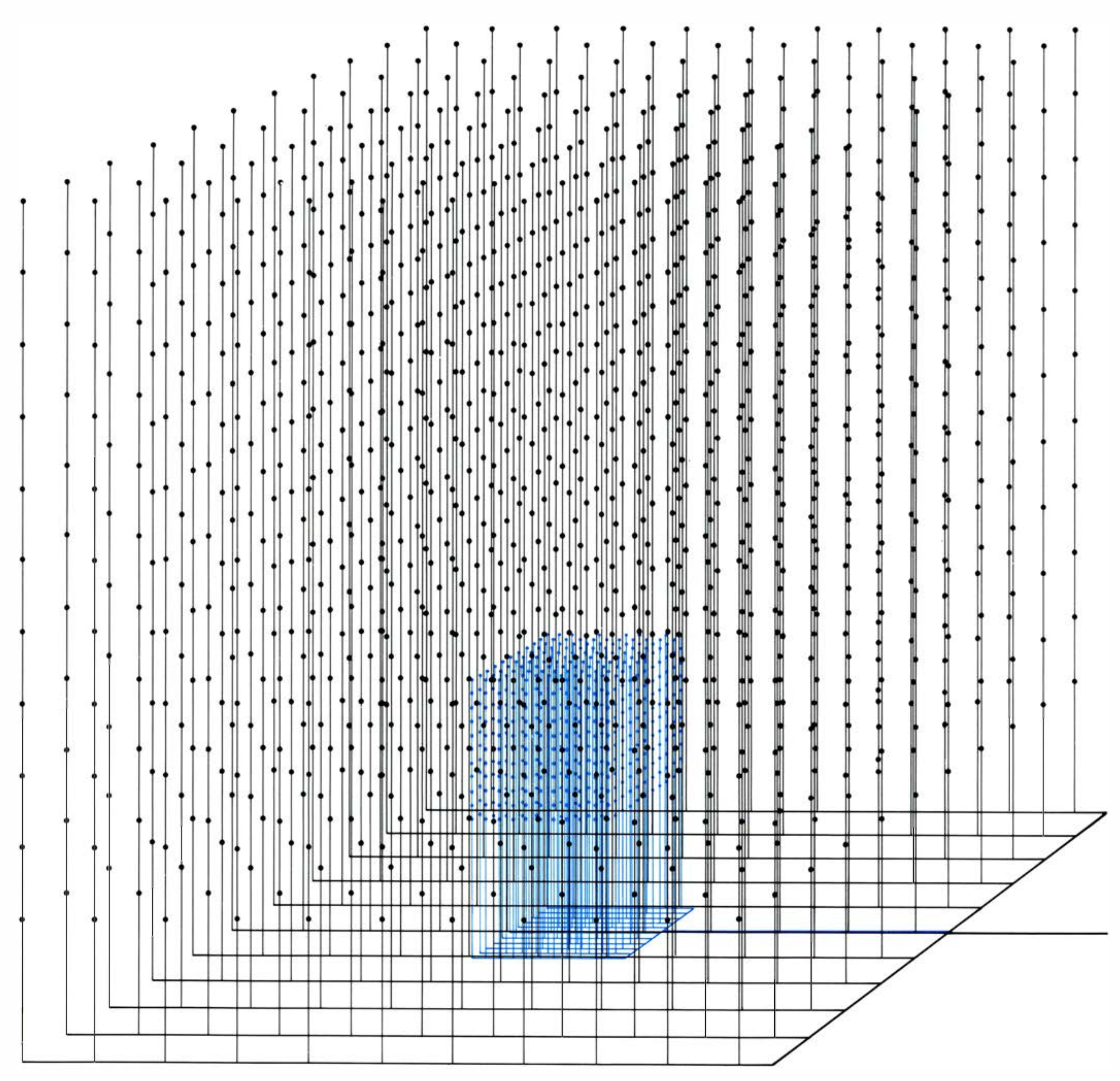
El aparato DUMAND no será el primer telescopio de neutrinos. A principios del decenio de 1960, Raymond Davis, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, realizó el primer intento serio de astronomía de neutrinos. Se propuso detectar neutrinos de baja energía emitidos por el Sol, la más brillante fuente en el cielo tanto de neutrinos como de fotones. Los neutrinos se originan en las profundidades del Sol, en las reacciones termonucleares que transmutan hidrógeno en helio con desprendimiento de energía. Casi una décima parte de la energía se la llevan los neutrinos, cuyas energías varían desde medio millón de electronvolt hasta 14 millones. El flujo de neutrinos de origen solar hasta la Tierra es sorprendente (a través del cuerpo humano pasan más de 100 millones cada segundo), pero se trata de partículas esquivas. Aun así, una pequeña fracción de ellas interacciona con una cantidad suficiente de materia.

Con un detector de gran masa e infinita paciencia, parece que Davis ha llegado a detectar neutrinos solares. Su detector consiste básicamente en un

gran depósito que contiene 610 toneladas del líquido quitamanchas ordinario, tetracloroetileno, cuyas moléculas constan de dos átomos de carbono y cuatro de cloro ($C_2\ Cl_4$). Una cuarta parte de los átomos de cloro son del isótopo cloro 37, y cuando un tal átomo captura un neutrino, se transforma en un átomo de argon 37. El argon 37 es radiactivo, de modo que la desintegración de un átomo del mismo implica la captura de un neutrino. Davis y sus colaboradores han pasado el último decenio tratando de registrar neutrinos solares. El experimento ha empezado, por fin, a producir una señal positiva, aunque no tan grande como se esperaba.

A lo largo de esos diez años se ha ido desarrollando otra clase de telescopio de neutrinos de baja energía. Consta de un tanque de agua equipado con detectores de luz. Si un neutrino interacciona con un átomo del agua, la interacción da lugar a partículas cargadas que rebotan con alta energía. Cuando una tal partícula viaja a través de un medio transparente más deprisa que la velocidad de la luz en ese medio, emite la característica luminosidad azul de la radiación de Cerenkov; el débil relámpago de esta luz es lo captado por los detectores.

Los telescopios de neutrinos de baja energía están capacitados para registrar neutrinos procedentes de una supernova, estrella que se cree explota tras haber agotado su combustible nuclear y haber colapsado. En los pocos segundos de la explosión se libera más energía que a lo largo de toda la historia de la estrella. La mayor parte de esta energía escapa en forma de neutrinos, cada



CONJUNTO DE 1331 ELEMENTOS SENSIBLES A LA LUZ que puede ser anclado al fondo del océano en las islas Hawai a una profundidad de cinco kilómetros. Llamado DUMAND (*D*eep *u*nderwater *m*uon *a*nd *n*eutrino *d*etector, detector de muones y neutrinos instalado a gran profundidad marina), el sistema proyectado detectará el relámpago de radiación azul de Cerenkov generado por la cascada de partículas creada cuando un neutrino choca con una partícula en el núcleo de un átomo integrante del agua del mar. Si se aprueba y financia el proyecto DUMAND, los sensores se colocarán a intervalos de 50 metros en el seno de 125 millones de toneladas métricas de agua. Un conjunto más interno constará de 1331 sensores espaciados a intervalos de 10 metros. El sistema externo detectará los neutrinos cuya energía exceda 10^{12} electronvolt; el interno vigilará los neutrinos de menos energía y los muones múltiples. Los sensores están unidos por cable a un ordenador situado en la costa. Los dos conjuntos son sólo una de las configuraciones en estudio.

uno de los cuales tiene típicamente una energía de 15 millones de electronvolt. Un detector con una masa de varias toneladas podría detectar neutrinos procedentes de una supernova que se produjera al otro lado de nuestra galaxia. Los astrofísicos cuentan con varios telescopios de neutrinos de baja energía apuntados para observar la próxima de tales supernovas.

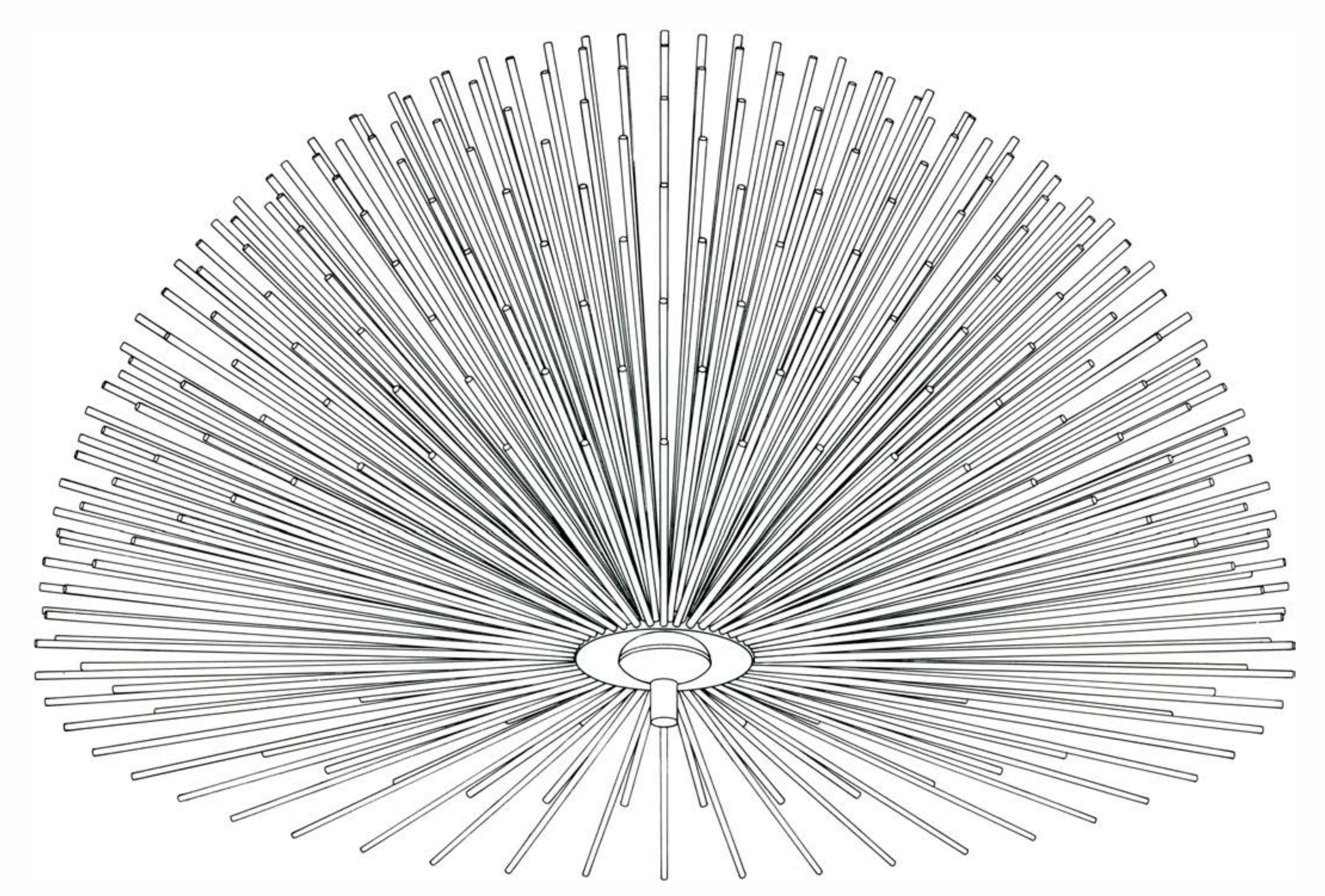
Algunos neutrinos tienen una energía mucho mayor que los producidos en supernovas o en el interior de estrellas tales como el Sol. En la atmósfera terrestre y en muchos sistemas astrofísicos se crean neutrones con energías que exceden los 10^9 electronvolt. Tales neutrinos son el resultado de colisiones extremadamente energéticas entre nucleones. Por ejemplo, se originan neutrinos de alta energía cuando rayos cósmicos de energía suficiente inciden sobre el núcleo de átomos en la atmósfera terrestre. DUMAND podrá detectar neutrinos con energías superiores a 10^{11} electronvolt.

La historia de los intentos por detectar neutrinos de alta energía fuera de los aceleradores de partículas es muy corta. Ha habido sólo cuatro experimentos, de los que el primero y mayor fue realizado por Reines y sus colaboradores. Los detectores empleados constaban de extensas distribuciones de sensores dispuestos en pozos de minas. Cuando casualmente un neutrino de alta energía interacciona con un nucleón de la roca circundante, crea un chubasco de partículas eléctricamente cargadas que son registradas por los sensores.

Si el neutrino lo es de muon, con una energía de más de 10^9 electronvolt, las partículas que emergen del choque incluirán, por lo general, un muon. Los muones detentan un gran poder de penetración; si pensamos, por ejemplo, en uno dotado de gran energía, éste podrá penetrar hasta un kilómetro de roca adentro. Por consiguiente, podrá detectarse el neutrino aun cuando interaccione con un nucleón a un kilómetro del sensor: el muon resultante continuará aproximadamente a lo largo de la trayectoria del neutrino y tropezará con el sensor. Así pues, el tamaño efectivo del detector excede ampliamente su dimensión física.

Los muones se originan también en la alta atmósfera, en choques entre los rayos cósmicos y nucleones de moléculas de aire; los muones pondrán en funcionamiento un detector de neutrinos de alta energía si pueden alcanzarlo. Para impedir, precisamente, que los muones atmosféricos enmascaren a aquellos otros menos corrientes, generados por neutrinos, es por lo que el detector debe colocarse a gran profundidad de la superficie. El detector de Reines, que tenía un área total de 140 metros cuadrados, estaba a casi tres kilómetros, en el interior del pozo de mina más profundo del mundo (cerca de Johannesburgo, Africa del Sur). La profundidad y el coste de la instalación limitó el tamaño del detector, y no reveló ninguna fuente de neutrinos exterior a la atmósfera terrestre. Pero hasta el propio resultado negativo tiene su interés astrofísico: guarda relación con la producción de deuterio (hidrógeno pesado) en el universo, producción en la que los nucleones chocan y originan neutrinos.

El aparato DUMAND será mucho más sensible que los restantes detectores de neutrinos de alta energía, principalmente porque estará mejor protegido y



ERIZO DE MAR: tipo de sensor luminoso en estudio para su incorporación al proyecto DUMAND. El sensor tiene 500 púas, cada una de dos metros y medio de largo, radiando desde un tubo fotomultiplicador hemisférico. Las púas están rellenas de un producto químico que desarrolla fluorescencia cuando recibe un relámpago de radiación Cerenkov. La fluorescencia se propaga luego a través de la fibra óptica de la púa y dispara el fotomultiplicador, indicando el paso de la partícula que originó la radiación Cerenkov. Cada uno de los 1331 sensores del sistema externo DUMAND puede ser un erizo de mar.

podrá detectar interacciones de neutrinos en un volumen de materia mucho mayor. El actual plan prevé una instalación total de 2000 sensores de luz en el interior de un kilómetro cúbico de agua del mar. Los sensores se anclarán entre sí y con el fondo del océano mediante cables flexibles. El conjunto entero se hallará conectado a un ordenador situado en la costa.

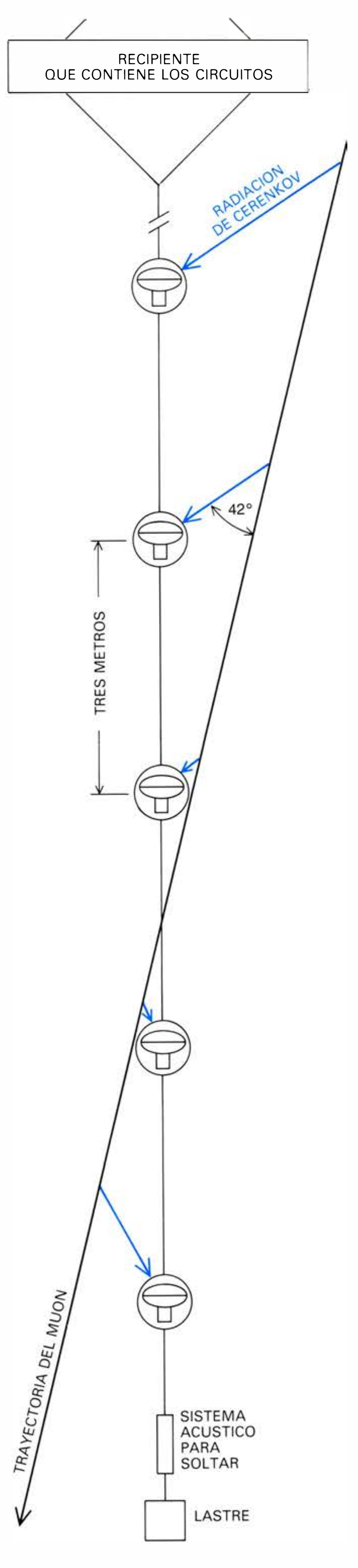
El sistema DUMAND detectará en forma eficaz una interacción única de neutrino si la energía del neutrino excede 10^{11} electronvolt. Los neutrinos de menor energía quedarán registrados únicamente en el caso de que varios de ellos incidan simultáneamente sobre el detector, lo que muy bien podría suceder si un sistema astrofísico produjera un potente estallido de ellos. Una característica esencial del conjunto será su capacidad para determinar la dirección de la que provino un neutrino detectado. El grueso de las partículas cargadas originadas en la interacción de un neutrino y un nucleón de agua marina avanzará unos 10 metros en una dirección que no diferirá en más de 10 grados de la trayectoria del neutrino incidente. Las partículas cargadas chocarán con otras partículas en el agua, que a su vez lo harán con otras partículas, desencadenando una cascada de quizá varios millones de partículas. La cascada irá acompañada de miles de millones de leves relámpagos de radiación de Cerenkov y activará los sensores de luz en la inmediata vecindad.

Un muon que se encontrase entre las partículas cargadas, por ser excepcionalmente penetrante, emitiría luz en su largo camino a través del agua del mar. Para neutrinos de energía de unos 10^{12} electronvolt, el recorrido típico del muon tiene una longitud de al menos un kilómetro. El análisis mediante ordenador de las respuestas del sensor debe fijar la dirección del neutrino incidente dentro de un error inferior a medio grado. Según Arthur Roberts y Victor J. Stenger, del Centro DUMAND de Hawai, el análisis mediante ordenador del número total de fotones Cerenkov detectados debe establecer la energía del neutrino con aceptable exactitud.

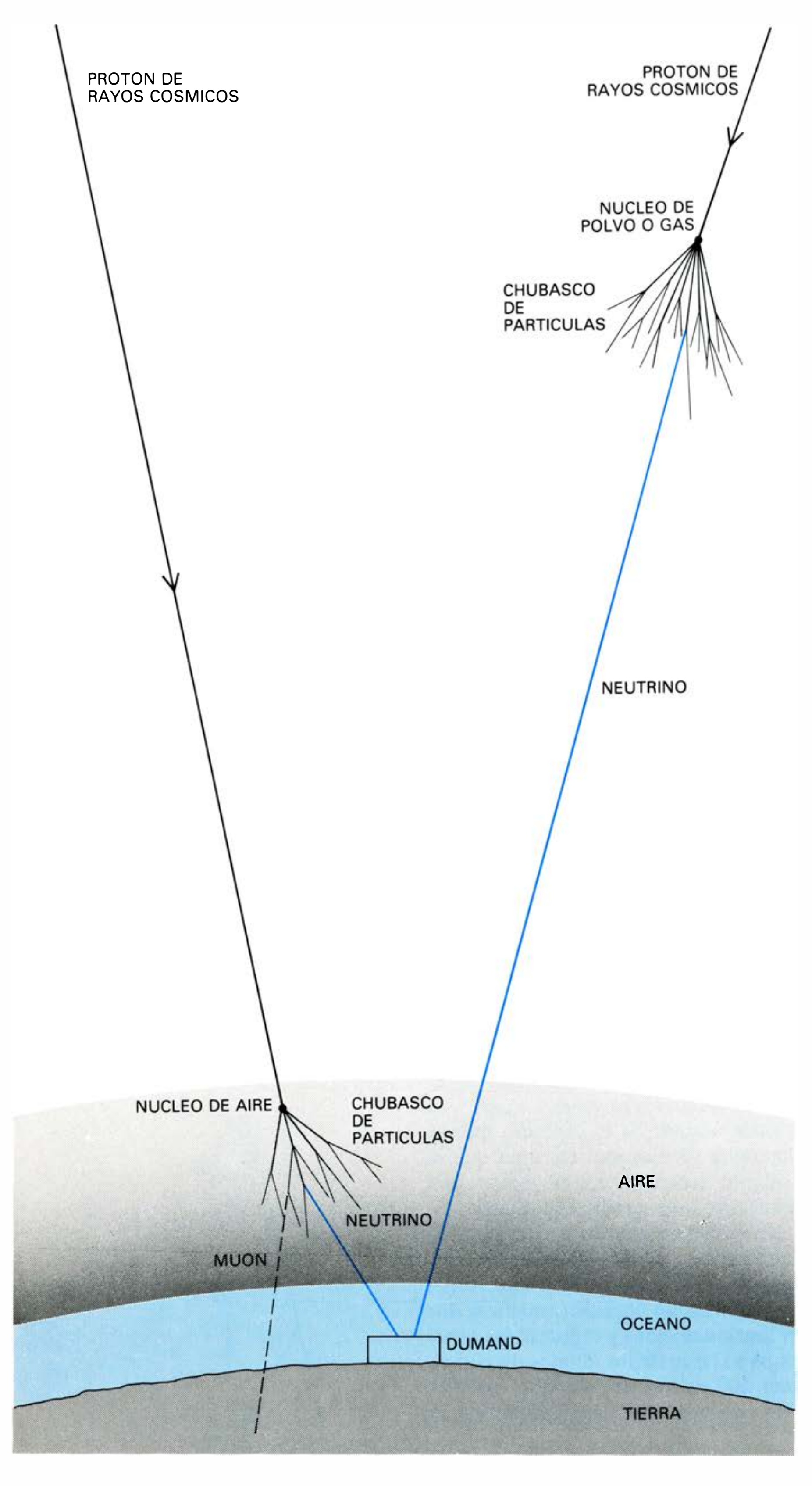
Aunque el conjunto DUMAND tendrá una sección eficaz de un kilómetro cuadrado para la detección de muones, su área efectiva de captura para detección de neutrinos será mucho menor. Para un neutrino con una energía de 10^{12} electronvolt, cada nucleón de agua de mar suministra un blanco efectivo de 10^{-35} centímetros cuadrados. Un kilómetro cúbico de agua de mar contiene 6×10^{38} nucleones, de modo que el área total de captura dentro del conjunto DUMAND se acerca a los 6000 centímetros cuadrados. A diferencia de los telescopios que registran fotones, el telescopio de neutrinos estará apuntando en todas las direcciones al mismo tiempo: incluso detectará neutrinos que vayan hacia arriba procedentes de la Tierra. Tres o más detecciones por año de neutrinos de alta energía procedentes de una dirección dada podría constituir un resultado estadísticamente significativo. Tal resultado correspondería a un flujo de energía mínimo de 15 electronvolt por centímetro cuadrado y por segundo. Si se tiene en cuenta la distancia que puede recorrer el muon generado por neutrinos, el tamaño efectivo del detector es mucho mayor.

A Theodore Boówen, de la Universidad de Arizona, se le debe la idea de otro modo posible de aprovechar el océano para detectar neutrinos. La cascada de partículas activada por el choque del neutrino calienta un volumen de agua en forma de varilla. El calor dilata el agua y provoca una pequeña compresión, u onda sonora, que puede recorrer una longitud de hasta unos 10 kilómetros antes de absorberse o perderse en el ruido de fondo del océano. Si se pudieran idear sensores acústicos que "oyesen" la cascada, tendrían un alcance mucho mayor del que disfrutan los sensores ópticos. Sin embargo, para un muon o cascada de partículas cuya energía sea inferior a 10^{16} electronvolt, el impulso sonoro se perderá rápidamente en el ruido de fondo. Si hay neutrinos que pueden provocar una cascada de más de 10^{16} electronvolt, los sensores acústicos podrán determinar la trayectoria de los neutrinos a partir de la onda sonora de la cascada, que es altamente direccional. De aquí que el conjunto DUMAND pueda incluir una distribución de sensores acústicos.

No será pequeña la proeza técnica que supone colocar miles de sensores ópticos y acústicos a cinco kilómetros de profundidad oceánica, mantenerlos en funcionamiento y registrar sus señales. A lo largo de los últimos diez años, unos 100 físicos, astrónomos, ingenieros y oceanógrafos, bajo la dirección de



CINCO SENSORES DE MUONES cuya instalación está prevista para esta primavera. Se colocarán a profundidades entre uno y cinco kilómetros. A lo largo de un período de dos semanas, la sarta de sensores puede detectar cuatro muones generados por neutrinos y numerosos muones atmosféricos. Si el muon detectado procede de abajo, tendrá un inequívoco origen en un neutrino porque sólo esta última partícula podría haber atravesado toda la Tierra. Estos sensores fotomultiplicadores sin púas podrían emplearse en el proyecto DUMAND sustituyendo a los del tipo de los erizos de mar.



HAY DOS CLASES DE FUENTES (ATMOSFERICA Y ASTROFISICA) que generan los neutrinos que dispararán el sistema DUMAND. Los neutrinos se forman cuando un protón de gran energía choca con un nucleón (protón o neutrón). El choque da lugar a piones y kaones que se desintegran en neutrinos, muones y otras partículas. Los piones y los kaones originados por choques protón-neutrón en la atmósfera terrestre son generalmente absorbidos por la atmósfera o el suelo, antes de que hayan tenido tiempo de desintegrarse en neutrinos. En el espacio interestelar, la densidad de materia es tan baja que los piones y kaones (así como los muones) no serán absorbidos, y de aquí que tengan tiempo para desintegrarse dando neutrinos. Para energías suficientemente altas, el fenómeno relativista de dilatación del tiempo produce el efecto de prolongar la vida media de los piones y kaones, hasta el punto de que la mayoría de los piones y kaones atmosféricos chocarán con un nucleón en una molécula de aire antes de que tengan tiempo de desintegrarse dando neutrinos y otros productos. Por tanto, para energías suficientemente altas, los neutrinos extraterrestres dominarán entre los sucesos que irá registrando el aparato DUMAND.

Reines, han estado evaluando posibles puntos de instalación en el fondo del océano, han estudiado cuál sería la forma mejor de colocación del aparato y han investigado diferentes clases de sensores ópticos y acústicos. Tras una serie de estudios y reuniones de trabajo se decidió que las islas Hawai constituían el lugar idóneo. Por tratarse de islas volcánicas de abrupta pendiente, el fondo del océano es muy profundo cerca de la costa; los sensores serán, pues, más accesibles. En el suelo oceánico inmediato a las islas no abundan las corrientes intensas y apenas existe actividad biológica que pudiera entorpecer el funcionamiento de los sensores.

Otra ventaja de las islas Hawai estriba en que, en sus proximidades, la profundidad marina es desusadamente transparente para la luz azul. Recientes ensayos llevados acabo a 20 kilómetros al Oeste de las islas Hawai, a una profundidad de 4,5 kilómetros, demostraron que un relámpago de luz azul se atenúa en un 64 por ciento a lo largo de la distancia, sorprendentemente grande, de 25 metros. Como resultado, los sensores DUMAND pueden colocarse no a intervalos de 20 metros, que era lo planeado en un comienzo, sino a intervalos de más de 50 metros, por lo que se requerirán menos sensores para vigilar el mismo volumen de agua.

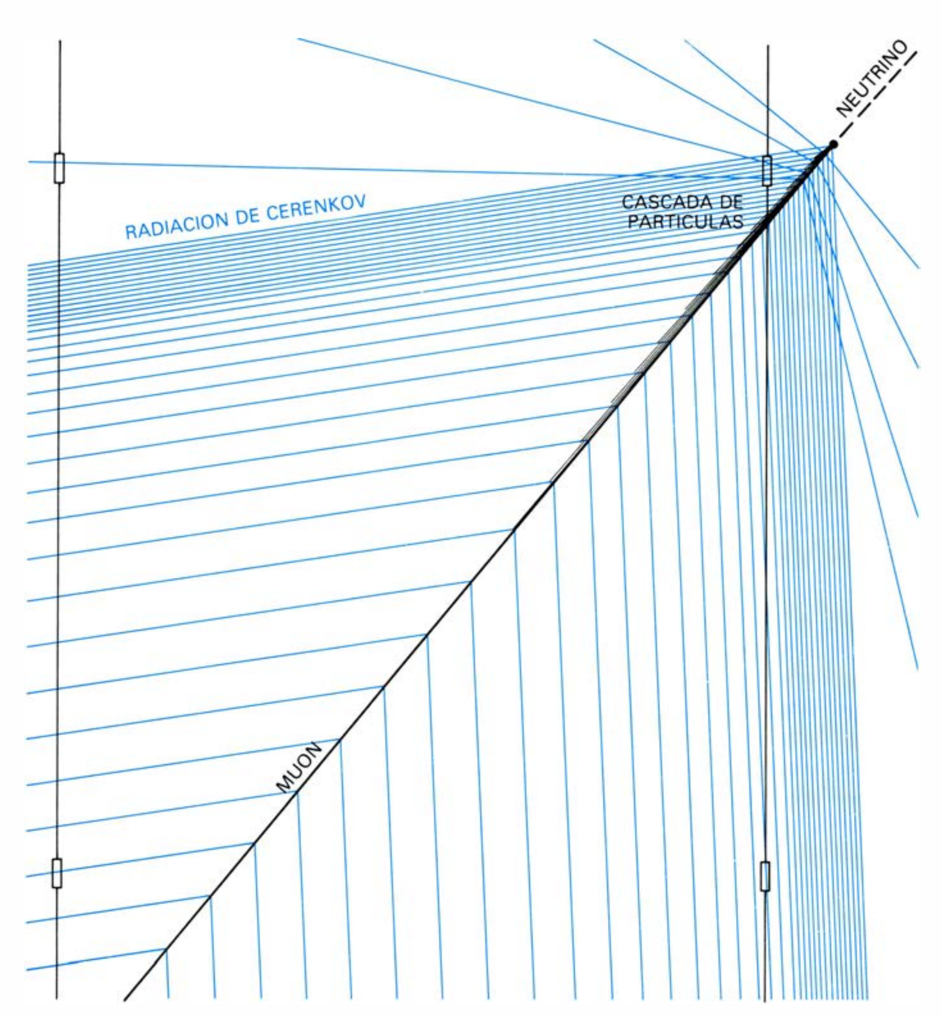
El costo del proyecto DUMAND se estimó inicialmente en unos 100 millones de dólares, pero la necesidad de menor número de detectores ha reducido de un modo sensible el presupuesto. Además, la organización DUMAND se propone construir e instalar un conjunto menor de sensores antes de poner en funcionamiento el proyecto en gran escala. Este proyecto costaría unos 5 millones de dólares. Si se aprueba el proyecto menor y se suministran los fondos, el conjunto podría empezar a recoger datos dentro de unos tres años.

Esta primavera, un grupo de investigadores dirigidos por Vincent Z. Peterson, del Centro DUMAND de Hawai, se propone colocar una línea de cinco sensores de muones a profundidades de entre uno y cinco kilómetros. Los sensores recogerán datos durante dos semanas, tiempo en el que se espera detecten miles de muones atmosféricos y tal vez cuatro muones inducidos por neutrinos. Si los muones detectados vienen de abajo, deberán su origen, indudablemente, a neutrinos; sólo estas últimas partículas pueden atravesar la Tierra. El funcionamiento de la línea de sensores debe ayudar a establecer la viabilidad del proyecto DUMAND.

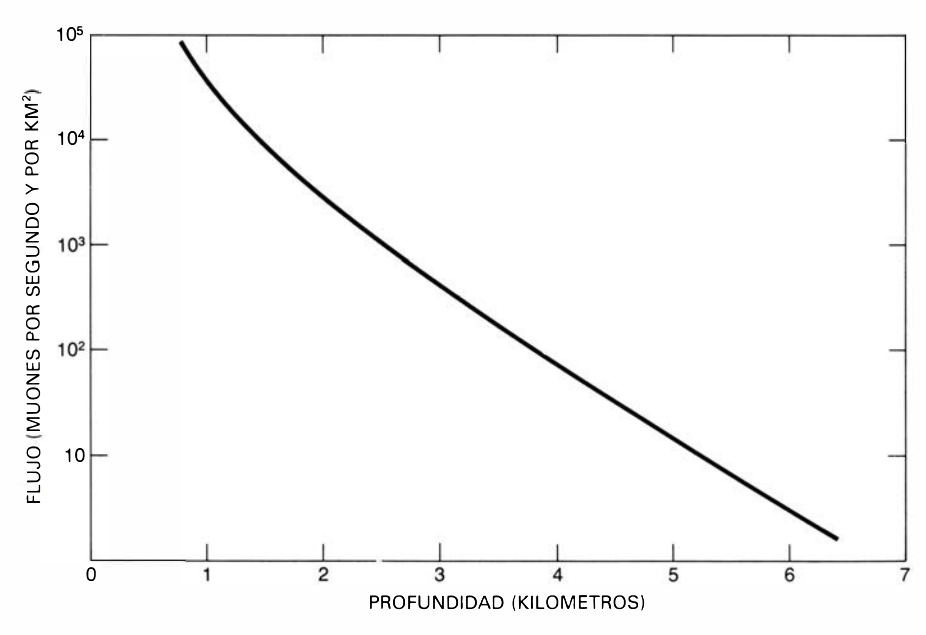
¿Cuál es la causa original de los neutrinos de alta energía que el sistema DUMAND detectará? El neutrino es un producto principal de la desintegración de los hadrones inestables, el pion y el kaon. Los piones y kaones se crean copiosamente cuando un protón relativista, es decir, que se mueve a velocidad próxima a la de la luz, choca con un nucleón. Aproximadamente un tercio de los piones carecen de carga eléctrica; se desintegran produciendo rayos gamma. Los piones cargados y la mayoría de los kaones se desintegran dando neutrinos, muones, electrones y sus antipartículas. Cuando un protón relativista choca con un nucleón estacionario, los piones, kaones y productos de desintegración continúan todos en la misma dirección que el protón. En muchos de tales choques, uno de los productos de desintegración (el neutrino por ejemplo) hereda una importante fracción de la energía del protón.

En resumen, la producción de neutrinos de alta energía requiere protones de alta energía y un blanco estacionario de nucleones que los protones puedan bombardear. Con la excepción de los aceleradores de partículas, la principal fuente terrestre de neutrinos de alta energía es el choque de los protones de los rayos cósmicos sobre los nucleones de las moléculas de aire en la atmósfera superior. Cuando los piones y kaones creados en tales choques pueden desintegrarse antes de su absorción en la atmósfera o en el suelo, originan neutrinos.

El efecto relativista de la dilatación del tiempo prolonga la vida de los piones y los kaones que tengan energía particularmente alta. Para los piones y kaones con energías por encima de 10^{12} electronvolt, el efecto de la dilatación de tiempo importa alargar sus vidas medias hasta el punto de que muchos de ellos llegarán a chocar con partículas en el aire en vez de desintegrarse dando neutrinos y otros productos. Los protones de los rayos cósmicos que penetran en la atmósfera terrestre con incidencia próxima a la rasante originan partículas secundarias que pasan rozando la cima de la atmósfera, donde la densidad de moléculas de aire es baja. Tales partículas tienen mayor probabilidad de desintegrarse antes de sufrir un choque que aquellas que viajan directamente hacia abajo penetrando en las regiones más densas de la atmósfera, donde es mucho más alta la probabilidad de un choque. A energías del orden de 10^{12} electronvolt, provienen de la dirección horizontal 4 veces más neutrinos atmosféricos que de los que



UNA CASCADA DE QUIZAS UN MILLON DE PARTICULAS se puede originar cuando un neutrino choca con una partícula en el núcleo de un átomo de agua del mar. Estas partículas generan, a su vez, miles de millones de fotones de radiación de Cerenkov. La luz emitida viajará al menos 25 metros antes de ser fuertemente atenuada, lo que constituye la razón de que se piense en colocar los sensores de luz del DUMAND cada 50 metros. Un muon que emergiera de tal choque continuará casi en la dirección de la trayectoria seguida por el neutrino. El muon emite la luz azul característica de la radiación Cerenkov.



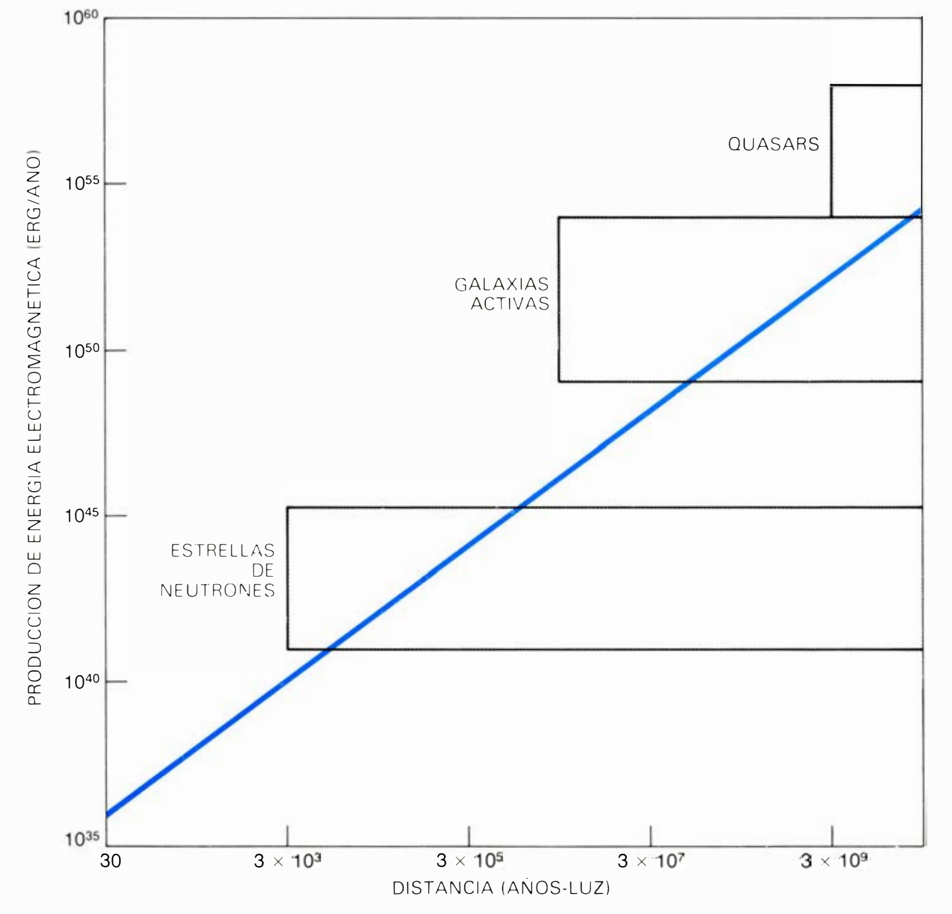
FLUJO DE MUONES en la proximidad de la superficie de la Tierra. Indica cómo los muones generados por choques de rayos cósmicos en la atmósfera terrestre pueden saturar un detector de neutrinos. A una profundidad submarina de hasta cinco kilómetros, el sistema DUMAND tendrá que procesar 10 muones por segundo. Los muones generados por choques de rayos cósmicos en la atmósfera terrestre proceden de una dirección vertical; los generados por choques neutrino-nucleón vienen de todas las direcciones.

provienen de la vertical. Esta dependencia angular manifiesta que los neutrinos se originaron en la atmósfera.

Los protones de los rayos cósmicos no sólo chocan con los nucleones en la atmósfera, sino también con protones en el medio enrarecido existente entre las estrellas de nuestra galaxia. En las regiones de la galaxia donde los protones han sido acelerados hasta energías altas, la densidad de materia es típicamente tan baja que todas las partículas secundarias creadas en un choque se desintegran y dan neutrinos antes de que pierdan la mayor parte de su energía en choques ulteriores. En este sentido, la producción de neutrinos es más eficaz en la galaxia en general que en la atmósfera terrestre. Los neutrinos extraterrestres, cabe presumirlo, predominarán entre los detectados por el conjunto DUMAND a las altas energías en que la producción de dichas partículas en la atmósfera es menos eficaz.

Los neutrinos de alta energía creados en los choques interestelares de los rayos cósmicos desencadenarán, probablemente, unos cientos de cuentas en el conjunto DUMAND cada año. Estos neutrinos, sin embargo, provendrán de un amplio sector del cielo; y quizá no sea fácil distinguir una señal tan difusa del fondo de neutrinos atmosféricos. El que DUMAND logre o no resolver la señal dependerá de la distribución precisa de energía de los rayos cósmicos en la galaxia. Sin embargo, incluso el no llegar a detectar la señal sería un valioso resultado para nuestro conocimiento de las fuentes de rayos cósmicos.

Una señal concentrada de neutrinos podría provenir de choques más próximos a una fuente de protones relativistas. En este caso, los neutrinos no procederían de un amplio sector del cielo, sino de una fuente puntual, por lo que se destacarían sobre el ruido de fondo atmosférico mucho mejor que una señal difusa. Hay muchos sistemas astrofísicos que generan partículas relativistas, dentro y fuera de la galaxia: las estrellas de neutrones, las ondas de choque de las supernovas, los núcleos activos de otras galaxias e incluso los quasars. Los choques de protones relativistas provenientes de alguno de esos objetos podrían originar neutrinos que DUMAND registrara.



PRODUCCION DE ENERGIA ELECTROMAGNETICA de varios sistemas astrofísicos en función de su distancia al sistema solar. Ambos ejes aparecen representados en escala logarítmica. La línea de color corresponde al flujo mínimo de neutrinos de alta energía que el sistema DUMAND podrá detectar. Para ser detectados por éste, los objetos que estén claramente por encima de tal línea sólo necesitan generar neutrinos cuyo flujo de energía sea una pequeña fracción del flujo de energía electromagnética. La producción de energía electromagnética de una estrella de neutrones joven alcanza los 10^{52} erg por año.

Un sencillo escenario para la generación de neutrinos lo constituye la proximidad de la superficie de un objeto astrofísico masivo, en donde se están originando protones relativistas. (Un ejemplo a modesta escala es una fulguración solar, donde la energía magnética liberada bruscamente cerca de la superficie del Sol da por resultado que los protones sean acelerados hasta velocidades extremadamente altas.) Si algunos de esos protones caen entonces sobre la superficie del objeto, el propio objeto suministra los nucleones que hacen de blanco. Los choques resultantes producen neutrinos, muchos de los cuales atraviesan el objeto y prosiguen su trayectoria a lo largo de enormes distancias.

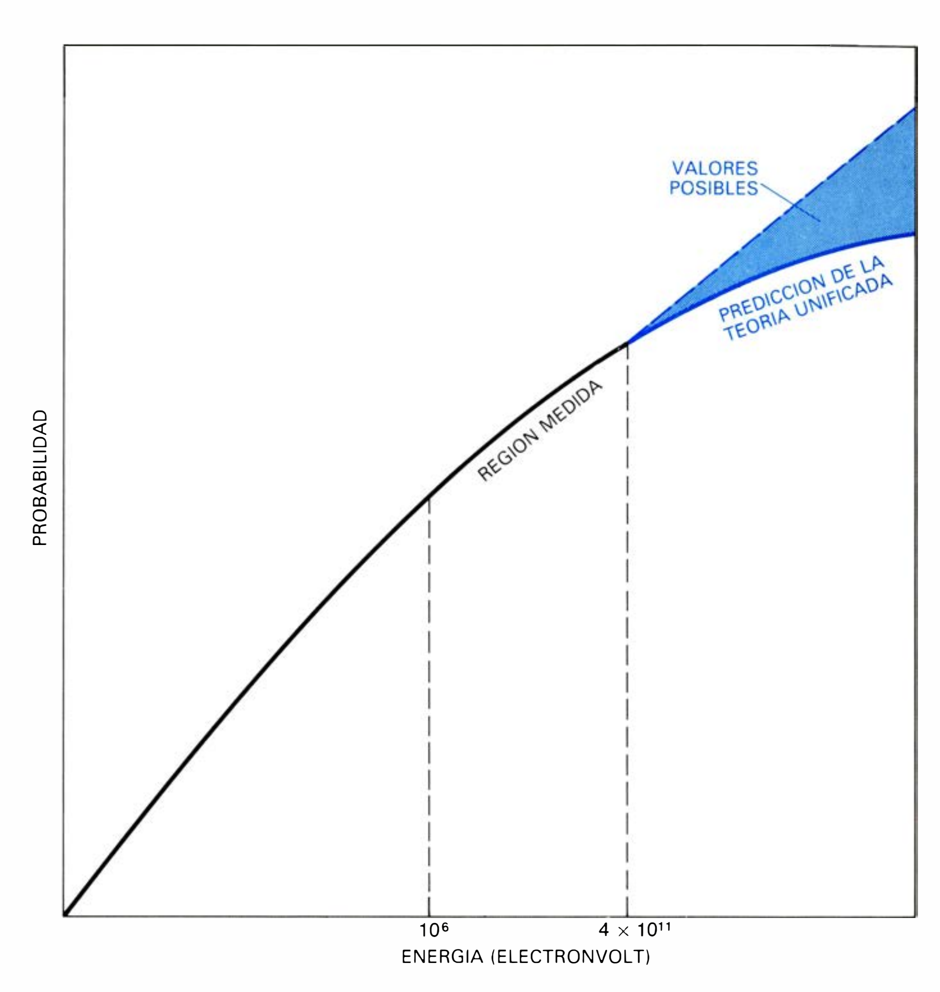
Otro escenario: allí donde hay materia depositándose, o cayendo, sobre un objeto compacto, con lo que suministra el blanco para las partículas relativistas generadas por el objeto. Muchas fuentes galácticas de rayos X son estrellas de neutrones sobre las que se está depositando materia. La propia emisión de rayos X de la fuente se alimenta de la materia que cae. La energía de los quasars y núcleos galácticos activos puede surgir del mismo proceso. De acuerdo con algunas teorías, los quasars y núcleos galácticos activos generan partículas relativistas en sus zonas más internas: tales objetos serían candidatos para la astronomía de neutrinos.

Si la materia depositada es suficientemente densa, ocultará el objeto a la visión. En ese caso, los neutrinos emitidos constituirían el único indicio de que se está desarrollando un proceso de alta energía en el objeto. Hace dos años se descubrió un notable sistema que está oculto por la materia que se deposita en él. Conocido por SS 433, parece constituido por un objeto compacto que está expulsando dos chorros de materia en direcciones opuestas a velocidades extremadamente altas [véase "El curioso espectro de SS 433", por Bruce Margon; INVESTIGACION Y CIENCIA; diciembre, 1980]. Algunos astrónomos estiman que SS 433 es 1000 veces más potente (es decir, expulsa 1000 veces más energía por segundo) que el más brillante de los objetos estelares conocidos en la galaxia.

¿Por qué hubo que esperar tanto para descubrir un objeto de semejante potencia? Pues por la sencilla razón de que SS 433 es una fuente de fotones relativamente débil. Aunque pueda parecer contradictorio que un objeto tan potente sea tan pálido, las dos propiedades van en realidad unidas. La mate-

ria que se acumula y da a SS 433 su enorme potencia actúa también de pantalla que atenúa a la vista su brillante región central. Los protones relativistas que se originen cerca del objeto compacto chocarán, sin duda, con otros nucleones, y los neutrinos resultantes podrán escapar. SS 433 puede ser tan potente que sólo se requiera que una millonésima parte de su balance energético se invierta en producción de neutrinos de alta energía para que DUMAND pueda detectarlos. No se sabe todavía exactamente qué sea SS 433, ni si realmente se están originando protones de alta energía en la materia que se deposita. Sin embargo, el descubrimiento de SS 433 apoya el punto de vista de que existen extraños sistemas astrofísicos ocultos por la materia que se está depositando sobre ellos y es fuente de su energía. La astronomía de neutrinos ofrece la única esperanza de detectar por vía directa tales objetos.

Muchos objetos estelares son sistemas binarios o dobles. Ello significa que un miembro del sistema puede suministrar nucleones blanco para partículas relativistas generadas por el otro. Si una joven estrella de neutrones en rápida rotación pertenece a un sistema binario, su compañera puede representar el papel de blanco. Cuando la compañera eclipse a la estrella de neutrones, los protones relativistas de la estrella de neutrones que choquen con los nucleones de la compañera originarán neutrinos que pasarán a través de la compañera a lo largo de la visual.



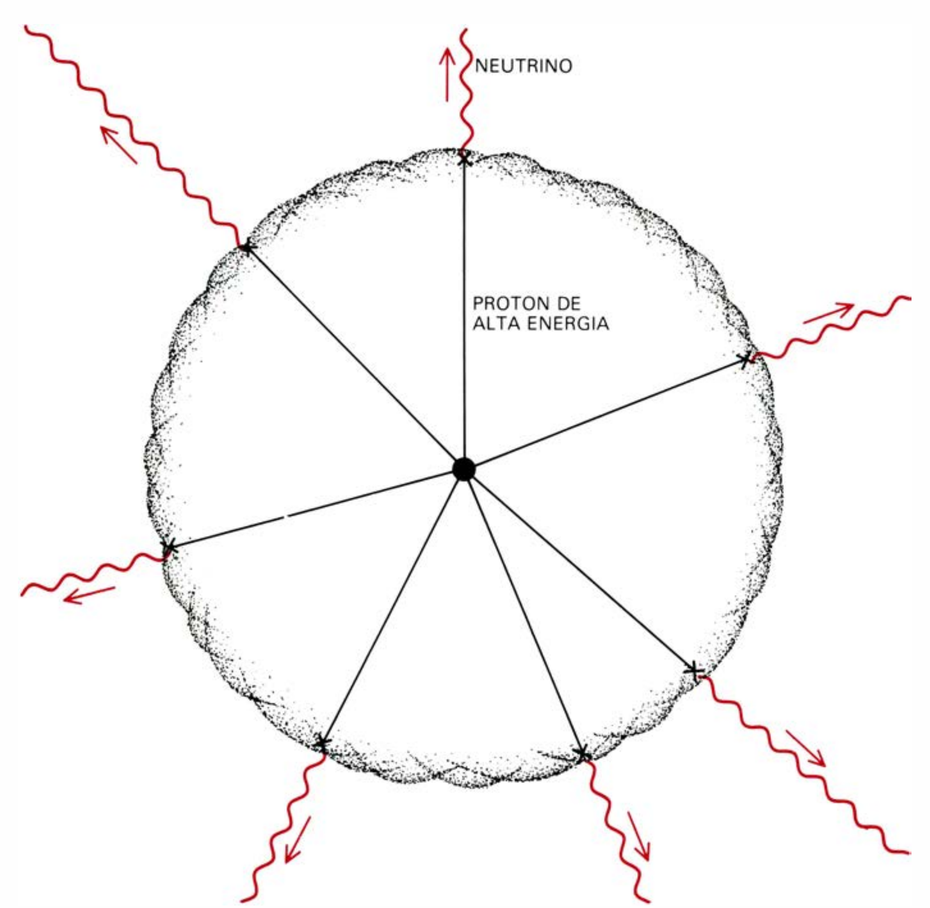
PROBABILIDAD DE UNA INTERACCION NEUTRINO-PROTON en función de la energía del neutrino incidente. La teoría electrodébil, que es una teoría unificada de la interacción débil y de la interacción electromagnética, predice que, para un neutrino por encima de una cierta energía, la probabilidad de interacción depende muy poco de la energía. Contando el número de interacciones por encima de la energía crítica, el proyecto DUMAND podrá someter a prueba esta predicción de física de partículas.

Las consideraciones teóricas parecen indicar que, en cualquier instante, podría haber en nuestra galaxia algunos sistemas binarios con una joven estrella de neutrones. Tal vez se haya observado uno de tales sistemas: la fuente de rayos X binaria Cisne X-3. La estrella de neutrones en Cisne X-3 emite rayos gamma, lo que implica que también genera partículas relativistas. Los rasgos de la emisión de rayos X indican que la totalidad del sistema está velado por una nube de gas que parece haberse evaporado de la superficie de la estrella compañera cuando ésta se calentó a causa de la radiación de la estrella de neutrones. La compañera eclipsa periódicamente la estrella de neutrones, momento en que dejan de detectarse los rayos X. De esta observación puede deducirse que la estrella compañera está entonces entre el sistema solar y las partículas relativistas asociadas a la estrella de neutrones. La geometría es ideal para la emisión de neutrinos de alta energía en dirección hacia nosotros.

Otro escenario de producción de neutrinos está relacionado con la expulsión de materia desde un objeto compacto. Por ejemplo, las estrellas de neutrones nacen al parecer en la explosión de supernovas. Cuando una estrella explota en forma de supernova, expulsa su capa más externa. La capa en expansión puede entonces suministrar la pantalla de nucleones blanco para los protones relativistas procedentes de la estrella de neutrones. De hecho, durante los primeros seis meses la capa sería opaca para los fotones y todas las otras partículas relativistas; razón por la cual la estrella de neutrones no podría observarse con telescopios corrientes. Se cree que, en este período de infancia, la estrella de neutrones es más potente que en ningún otro momento de su vida. El sistema DUMAND podría detectar neutrinos procedentes de una estrella de neutrones recién nacida y oculta por un velo de supernova, aun cuando no estuviera en nuestra propia galaxia, sino en otra próxima. Se supone que las explosiones de supernova se producen a razón de una por galaxia cada 20 años. En pocos años de funcionamiento, el sistema DUMAND podría captar neutrinos de alta energía procedentes de supernovas en una de las varias galaxias próximas.

En principio, la capa de supernova podría actuar como fuente de neutrinos durante un período muy superior a los seis meses. Si la capa tuviera un campo magnético importante, podría almacenar protones relativistas. La capa podría continuar entonces emitiendo neutrinos por tanto tiempo cuanto su densidad, incesantemente decreciente, permitiera que los protones relativistas chocaran con frecuencia. Estimamos que la capa sería lo suficientemente densa para suministrar neutrinos a lo largo de unos 50 años tal vez. Nuestra propia galaxia puede albergar dos o tres de tales fuentes de neutrinos, detectables por el proyecto DUMAND.

Estos son algunos de los escenarios astrofísicos más plausibles para la producción de neutrinos de alta energía. Hay otros muchos escenarios posibles relacionados con el mismo concepto: protones relativistas que chocan con un



UN SISTEMA DE SUPERNOVA JOVEN podría producir neutrinos cuando los protones de alta energía emitidos por la estrella de neutrones del centro del sistema chocaran con la materia de la capa en expansión del sistema. La capa, que durante los primeros seis meses puede detener los fotones y otras partículas relativistas que emanen de la estrella, sería transparente para los neutrinos. Estos constituirían tal vez la única señal de los procesos de alta energía que acontecen detrás de la pantalla de materia.

blanco del cual emergen neutrinos en virtud de esa colisión.

¿Será el sistema DUMAND lo suficientemente sensible para detectar los neutrinos creados por esos objetos diversos? Al no poderse detectar todavía los neutrinos, no cabe una respuesta categórica. La producción de energía de muchas clases de objetos celestes es, sin embargo, compatible con la hipótesis de que el proyecto DUMAND será capaz de detectar esas partículas. La Tierra se halla expuesta a un considerable flujo de energía electromagnética procedente de tales objetos; y, si está expuesta a un flujo de energía debida a neutrinos que sea solamente una pequeña fracción del flujo de energía electromagnética, entonces el sistema DUMAND podrá detectar los neutrinos.

Por ejemplo, el flujo de energía de fotones procedente de estrellas de neutrones en nuestra galaxia, de quasars y de núcleos activos de galaxias es del orden de unos miles de electronvolt por centímetro cuadrado y por segundo. Como el flujo umbral de neutrinos para DUMAND está entre 10 y 100 electronvolt por centímetro cuadrado y por segundo para neutrinos con energías entre 10^{12} y 10^{11} electronvolt, basta que las estrellas de neutrones, los quasars y los núcleos galácticos activos dediquen un uno por ciento de su balance de energía a los neutrinos de energías muy altas que serían detectados por el sistema DUMAND. Aun así, la producción de partículas relativistas en tales objetos ha de resultar muy eficaz. Hay, sin embargo, una prueba notable de que este requisito de gran rendimiento se da con frecuencia.

La Nebulosa del Cangrejo es el mejor conocido de los sistemas en los que se producen con gran rendimiento partículas de energías superiores a 10^{13} electronvolt. La nebulosa genera rayos X por el mecanismo del sincrotrón, en el cual los electrones de alta energía radian energía cuando son desviados por el campo magnético de la nebulosa. La intensidad estimada del campo implica que los electrones tienen cada uno una energía de unos 10^{13} electronvolt.

Los electrones de tal energía deberían radiar toda su energía en aproximadamente un año, y, sin embargo, su abundancia en la Nebulosa del Cangrejo no parece estar disminuyendo. Por tanto, los astrónomos han llegado a la conclusión de que los electrones están recibiendo, de alguna manera, nueva energía por la estrella de neutrones en rápida rotación situada en el centro de la nebulosa. La estrella de neutrones, cuya velocidad de rotación está decreciendo lentamente, emite un impulso de radiación una vez por revolución: se trata de un pulsar. De ese gradual decrecimiento de la velocidad de emisión de impulsos, los astrónomos han deducido la rapidez con que la rotación de la estrella está disminuyendo. El ritmo de decrecimiento de la velocidad de rotación da a su vez la velocidad aproximada a la que la estrella está perdiendo energía de rotación. El ritmo de pérdida de energía es comparable con la potencia necesaria para alimentar la emisión de sincrotrón de los electrones en la Nebulosa del Cangrejo. Esta concordancia numérica sugiere que la estrella de neutrones está de alguna manera convirtiendo una fracción grande de su energía de rotación en partículas relativistas.

Hallamos otro ejemplo de producción de partículas relativistas con alto rendimiento en un sistema de clase enteramente diferente: el brillante quasar 3C 273. Mediciones recientes, tomadas por instrumentos en satélites, revelan que el quasar emite casi tanta energía en rayos gamma como en cualquier otra región del espectro electromagnético. La energía de cada rayo gamma es superior a 10^{8} electronvolt, lo que significa que los rayos gamma pueden haber sido originados solamente por partículas relativistas (aunque todavía no se sabe con precisión cuán relativistas). Al parecer, el quasar está gastando una proporción muy alta de su dotación de energía en partículas relativistas. Consideraciones energéticas inclinan a pensar que los neutrinos procedentes de esta fuente podrían originar unas 100 cuentas por año en el aparato DUMAND. Aun cuando el quasar 3C 273 muestre un brillo excepcional, no deja de ser representativo de una amplia categoría de quasars y galaxias activas que se cree están también produciendo partículas relativistas con alto rendimiento. Otros lugares donde se generan partículas de alta energía con inesperada facilidad incluyen las ondas de compresión de las supernovas y, a una escala más modesta, las ondas de choque que proceden de una gran variedad de fuentes en nuestro propio sistema solar.

Los sistemas astrofísicos que originan neutrinos de alta energía también originan rayos gamma de energía comparable; por consiguiente, la medida del flujo de rayos gamma procedente de un sistema podría suministrar una indicación del flujo de neutrinos a espe-

rar. Sin embargo, no hay una correspondencia unívoca entre los rayos gamma detectados y los neutrinos que pueden esperarse. Aunque los rayos gamma de alta energía siempre se producen donde existen neutrinos de alta energía, éstos últimos no siempre se forman donde hay rayos gamma de alta energía. En otras palabras, el flujo de rayos gamma medido puede proceder en parte de fuentes que no crean neutrinos. Inversamente, el flujo de rayos gamma medido puede subestimar el de neutrinos si algunos de los rayos gamma producidos por fuentes de neutrinos no llegan a alcanzar la Tierra. En realidad, la misma pantalla de material que hace de blanco para originar los neutrinos puede absorber los rayos gamma. Además, cuando los rayos gamma de más energía atraviesan distancias astronómicas, muchos de ellos son detenidos por choques con otros fotones. A pesar de todo, y teniendo en cuenta esas restricciones, la astronomía de rayos gamma ayuda a estimar el flujo de neutrinos en la vecindad de la Tierra.

Los rayos gamma de interés tienen la misma energía (más de 10^{12} electronvolt) que los neutrinos para los que el sistema DUMAND es máximamente sensible. Designados VHEGR (*V*ery *h*igh *e*nergy *g*amma *r*ays, "rayos gamma de muy alta energía"), tienen más de 1000 veces la energía de los rayos gamma que los satélites acostumbran a observar. Los rayos gamma de muy alta energía se detectan mediante discos reflectores que recogen el débil rayo luminoso producido por el chubasco de partículas que marcan la entrada de un tal rayo gamma en la atmósfera terrestre. La astronomía VHEGR, que se ha estado ensayando durante dos decenios, ha empezado a dar resultados positivos en los últimos años.

Aunque una pantalla de materia que es suficientemente espesa para interceptar la mayoría de las partículas relativistas que inciden sobre ella lo será para bloquear el paso de rayos gamma, los escenarios de producción de neutrinos no requieren que la mayoría de los protones sean detenidos. Los neutrinos podrían producirse eficazmente sólo si la mitad de los protones fuesen detenidos. Es posible que una pantalla sea suficientemente espesa para detener una fracción importante de los protones incidentes, pero lo bastante delgada para dejar pasar la mayor parte de la radiación gamma. Encontramos un ejemplo de ello en la joven estrella de neutrones en el sistema binario Cisne X-3. Como la estrella de neutrones evapora, al parecer, materia de la superficie de su compañera, se la observa a través de un velo de materia cuando entra y sale del eclipse. En algún punto a medida que la estrella de neutrones se aleja de su posición eclipsada, el velo debe tener el espesor óptimo para la emisión de rayos gamma.

Esta conclusión se ha visto confirmada por la observación. A lo largo del pasado decenio, un grupo de astrónomos dirigidos por A. A. Stepanian, del Observatorio Astrofísico de Crimea, en la Unión Soviética, ha observado rayos gamma de muy alta energía emitidos por Cisne X-3. Esa constatación acaba de ser corroborada por el mismo grupo y por otro que trabaja en los Estados Unidos. Se ve que los rayos gamma sólo se emiten periódicamente; y se diría que la mayor parte de la radiación se

produce en el preciso instante en que la estrella de neutrones emerge de detrás de su compañera. Los rayos gamma se observaron solamente a lo largo del cinco por ciento del período orbital de la estrella de neutrones. Para dar cuenta del flujo de rayos gamma observado, la estrella de neutrones en el Cisne X-3, como la de la Nebulosa del Cangrejo, debe producir eficazmente partículas con una energía de 10^{13} electronvolt. Si los rayos gamma son el producto de la desintegración de piones, junto con ellos deben producirse neutrinos. Estimamos que esos neutrinos producirían unas 50 cuentas por año en el sistema DUMAND.

En 1975 se descubrió que de la radiogalaxia NGC 5128 emanaban rayos gamma de muy alta energía. Si esos rayos gamma procedieran de la desintegración de piones, los neutrinos acompañantes darían lugar al menos a varias cuentas por año en el sistema DUMAND. La importancia del descubrimiento con respecto a DUMAND estriba en que las galaxias activas son capaces de generar eficazmente partículas relativistas con energía suficiente para crear neutrinos que DUMAND puede detectar.

La astronomía de neutrinos puede también proporcionar respuestas a preguntas fundamentales en torno a la estructura general y la historia del universo. Entre esas cuestiones está la de si todas las galaxias se hallan constituidas de materia ordinaria o si aproximadamente la mitad de ellas están formadas de antimateria. El punto de vista corriente es que todas las galaxias están formadas de materia [véase "La asimetría cósmica entre materia y antimateria", por Frank Wilczec; INVESTIGACION Y CIENCIA; febrero, 1981]. Algunos investigadores, sin embargo, creen que existe una simetría general en el universo que exige que la mitad de él sea antimateria. La astronomía de fotones no puede resolver directamente la cuestión porque el fotón es su propia antipartícula y en consecuencia, no aporta información acerca de si su fuente fue materia o antimateria. Los neutrinos son diferentes de los antineutrinos y se pueden distinguir, mediante el sistema DUMAND, en razón de los detalles de la interacción. Las galaxias constituidas por materia emiten muchos más neutrinos que antineutrinos, de modo que una corriente suficientemente intensa de neutrinos procedentes de una galaxia debe revelar si ésta consta de materia o de antimateria.

El sistema DUMAND debe permitir examinar no sólo fenómenos astrofísicos, sino conceptos fundamentales en física de partículas, tales como la teoría electrodébil, o teoría unificada de las interacciones débiles y las interacciones electromagnéticas. Además de esas dos interacciones, existe una tercera fuerza fundamental en física nuclear: se trata de la interacción fuerte, que mantiene unidos a los nucleones. Los neutrinos sólo están sometidos a las interacciones débiles: no "sienten" las otras fuerzas nucleares. Según la teoría electrodébil, las interacciones débiles y las electromagnéticas tienen aproximadamente la misma intensidad hasta distancias muy pequeñas (inferiores a 10^{-16} centímetros) de un quark, para una partícula que esté sometida a ambas fuerzas. A pequeñas distancias, pues, la fuerza débil no es débil.

Un neutrino que atraviesa un protón tiene una probabilidad inferior a una millonésima de pasar suficientemente cerca de un quark y sentir la fuerza débil. Pero, a medida que aumenta la energía del neutrino, la fuerza débil desempeña un papel de importancia creciente, y la probabilidad de que el neutrino interaccione con el protón se hace mayor. La teoría electrodébil predice que, por encima de cierta energía crítica, la probabilidad de una interacción neutrino-protón deja de depender de la energía. En la atmósfera terrestre se están creando neutrinos cuya energía excede el valor crítico a un ritmo conocido. De éste y del número de interacciones neutrino-nucleón detectadas por el sistema DUMAND, se podría calcular la probabilidad de la interacción y la probabilidad medida por día compararse con la calculada. La teoría hace también predicciones acerca de la distribución de energía entre las diversas partículas cargadas que se crean en una interacción neutrino-protón. El sistema DUMAND estará capacitado para someter a prueba esas predicciones.

La organización DUMAND ha investigado recientemente la posibilidad de colocar otro tipo de detector en la superficie del mar o en la costa para medir la energía de los rayos cósmicos que generen los muones que sean detectados por el sistema DUMAND. La información acerca de la energía y de la distribución de los muones podría servir para desentrañar la naturaleza de las interacciones de alta energía y de los rayos cósmicos de alta energía.

La razón decisiva para acometer el proyecto DUMAND fue que hará uso de una fuente de información acerca del universo que hasta ahora no ha sido aprovechada. La extensión de la astronomía desde la luz visible primero hasta las ondas de radio, y después hasta los rayos X y gamma, no ha fracasado nunca en su fin: conducir al descubrimiento de objetos poco corrientes, tales como las radiogalaxias, los quasars y los pulsares. Todos esos objetos constituyeron una sorpresa. Es probable que la astronomía de neutrinos traiga consigo su propio cupo de sorpresas.

UN SISTEMA BINARIO DE ESTRELLAS podría también generar neutrinos. La radiación procedente de una estrella de neutrones podría vaporizar materia en la superficie de la estrella compañera. Tanto la materia vaporizada como la compañera podrían suministrar entonces una pantalla de nucleones blanco para las partículas de alta energía que emanen de la estrella de neutrones. En la posición *A*, la estrella de neutrones queda eclipsada por su compañera, y los neutrinos originados en el choque entre las partículas de alta energía, emitidas por la estrella de neutrones, y los nucleones de la estrella compañera pasarían a través de ésta a lo largo de la visual desde la Tierra. La estrella compañera detendría los rayos gamma, que se generan siempre junto con los neutrinos. Al salir del eclipse, la estrella de neutrones (*B*) se observa desde la Tierra a través del velo de materia vaporizada. El vapor podría ser suficientemente denso para detener muchas partículas de alta energía incidentes y lo bastante fino para permitir el paso de la mayor parte de la radiación gamma incidente. La fuente de rayos X Cisne X-3 podría ajustarse a tal escenario.

Las esculturas Nok de Nigeria

Estas singulares figuras de terracota se remontan a 2500 años atrás. Asociadas tanto a útiles de piedra como a hornos de fundición de hierro, las esculturas plantean problemas sobre la función del arte y la definición de una cultura

Thurstan Shaw

Nigeria es el país africano más habitado, con un área doble de la de California y más de tres veces el número de sus habitantes. Tiene también el patrimonio artístico más antiguo que se pueda hallar en el continente al sur de Sáhara. La escultura de Benín asombró al mundo por primera vez hace apenas un siglo. De entonces acá, multitud de otras obras, por ejemplo las de Ife e Igbo-Ukwu, han multiplicado aquel asombro y admiración iniciales.

Hace ya tiempo que los arqueólogos vienen intentando reconstruir las circunstancias económicas, sociales y políticas que dieron lugar a estos florecimientos artísticos en Nigeria. Es una tarea lenta, y mucha de la información necesaria para esa reconstrucción está aún por reunir. Hay, sin embargo, un hecho que puede darse por firmemente sentado: las manifestaciones más antiguas de la brillantez artística nigeriana se echan de ver en un notable repertorio de esculturas de terracota descubiertas en Nigeria central a lo largo del medio siglo último. Estas figuras de cerámica, antiguas, han surgido casi todas como resultado de la minería del estaño. Para comprender esta curiosa asociación de obras de arte con depósitos de mineral es preciso saber algo sobre la fisiografía del país.

Nigeria apenas tiene montañas ni tierras altas, exceptuados los montes de su frontera oriental y la meseta de Jos. Este último accidente, una penetración granítica que mide 100 kilómetros de norte a sur, se eleva por término medio a 1200 metros de altitud sobre el nivel del mar, y llega hasta los 1800 metros al este de la ciudad de Jos. Al enfriarse el magma de la penetración, los óxidos de estaño y otros minerales cristalizaron en ella, pero se encuentran tan dispersos que son difíciles y antieconómicos de extraer de la matriz del granito. Sin embargo, millones de años de erosión han transportado los pesados granos de estaño laderas abajo, y los han concentrado en los depósitos aluviales de las tierras bajas circundantes.

Durante la explotación de uno de estos yacimientos aluviales de estaño en 1928, el coronel Dent Young, copropietario de una asociación minera cerca de la aldehuela de Nok, recogió una escultura de terracota bien cocida, de 10 centímetros de altura, que apareció en el lavado de las gravas portadoras de estaño. Young donó su hallazgo al embrionario museo del Departamento de Minas de Jos. La escultura representa probablemente una cabeza humana, aunque por no conocerse entonces otros ejemplos de retratística Nok se pensó al principio que representaba un mono.

Quince años más tarde, en otra explotación de estaño próxima a Jemaa, a unos 65 kilómetros al este de Nok, fue recuperada una escultura de terracota mayor: una cabeza de 22 centímetros de altura. Había estado enterrada en la gravera a ocho metros de profundidad. El encargado de la mina se la llevó a su casa, para usarla como espantapájaros en su plantación de ñame. Allí la vio y adquirió el gerente de la mina, quien la transportó hasta Jos.

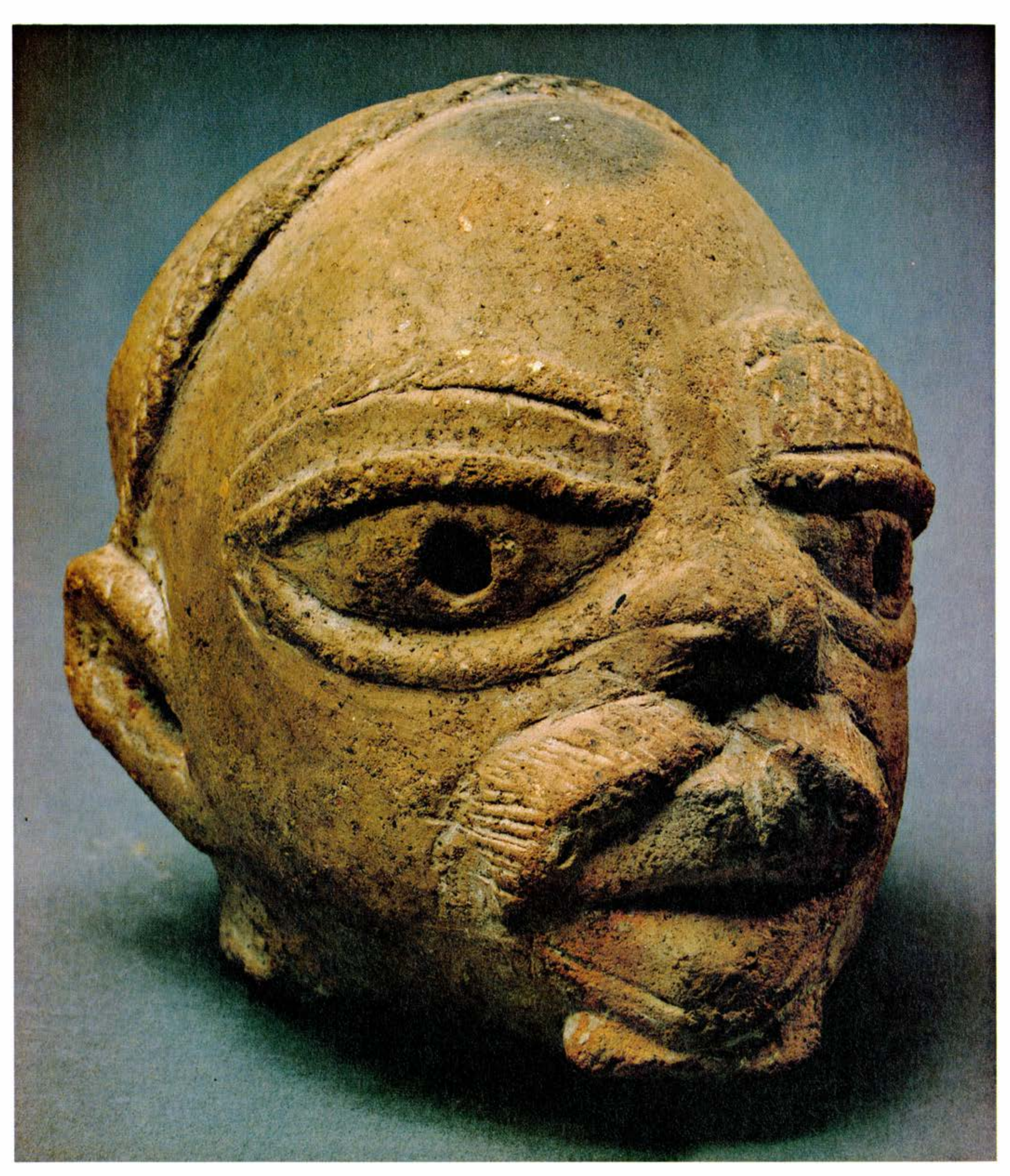
El hallazgo de Jemaa llamó la atención de Bernard E. B. Fagg, un joven empleado de la administración que había estudiado arqueología en la universidad de Cambridge y se hallaba entonces de vacaciones excavando un abrigo rocoso en la meseta de Jos, en busca de indicios de una primitiva ocupación humana. Fagg advirtió los rasgos semejantes entre la nueva cabeza y la de Nok, que ya estaba en el museo de Jos. Posteriormente, visitó a Young, quien le mostró una estatuilla de terracota, desenterrada recientemente, de un mono sentado, de cerca de 24 centímetros de alto. En una ulterior visita a Nok volvieron a mostrarle a Fagg otra escultura de terracota: una cabeza humana de 19 centímetros de alto. Fagg inspeccionó las explotaciones de estaño; los lavaderos y los vertederos resultaron contener fragmentos de terracota, con abundancia de fragmentos de cerámica y hachas de piedra fabricadas por fricción.

Llegados a este punto, resultaba obvio que la minería de estaño de las zonas de Nok y de Jemaa estaba a la par descubriendo y destruyendo material arqueológico de suma importancia. Fagg fue destinado por entonces al Servicio de Antigüedades de Nigeria, recién constituido y cuya misión asignada era conservar el patrimonio arqueológico del país. Fagg no tardó en organizar la vigilancia de las minas de estaño, asegurándose la cooperación de los mineros, para recuperar la mayor cantidad posible del material que se estaba descubriendo. También él se encargó de la publicación científica de los hallazgos efectuados hasta aquel momento. Considerando que el primero de los descubrimientos se había verificado en Nok, atribuyó las esculturas a la "cultura de Nok", según era acostumbrado entre los arqueólogos de la época.

Desde aquellos primeros tiempos, hace 35 años, se han descubierto muchas más esculturas de terracota, y a ellas está dedicada toda una sala del museo de Jos. Pronto se supo el interés del Servicio de Antigüedades en recompensar a quienes encontrasen las esculturas, y empezaron a aparecer terracotas en contextos distintos de los depósitos de las minas de estaño. Algunas procedían de graveras próximas a las carreteras; una se descubrió al preparar el terreno para el campo de deportes de un colegio. Unas cuantas se han encontrado en santuarios de los nativos, donde es de suponer que, después de ser desenterradas por casualidad, se las consideró dignas de veneración. Incidentes de este género ocurren hoy en Ife, donde terracotas descubiertas por azar van a parar a santuarios o

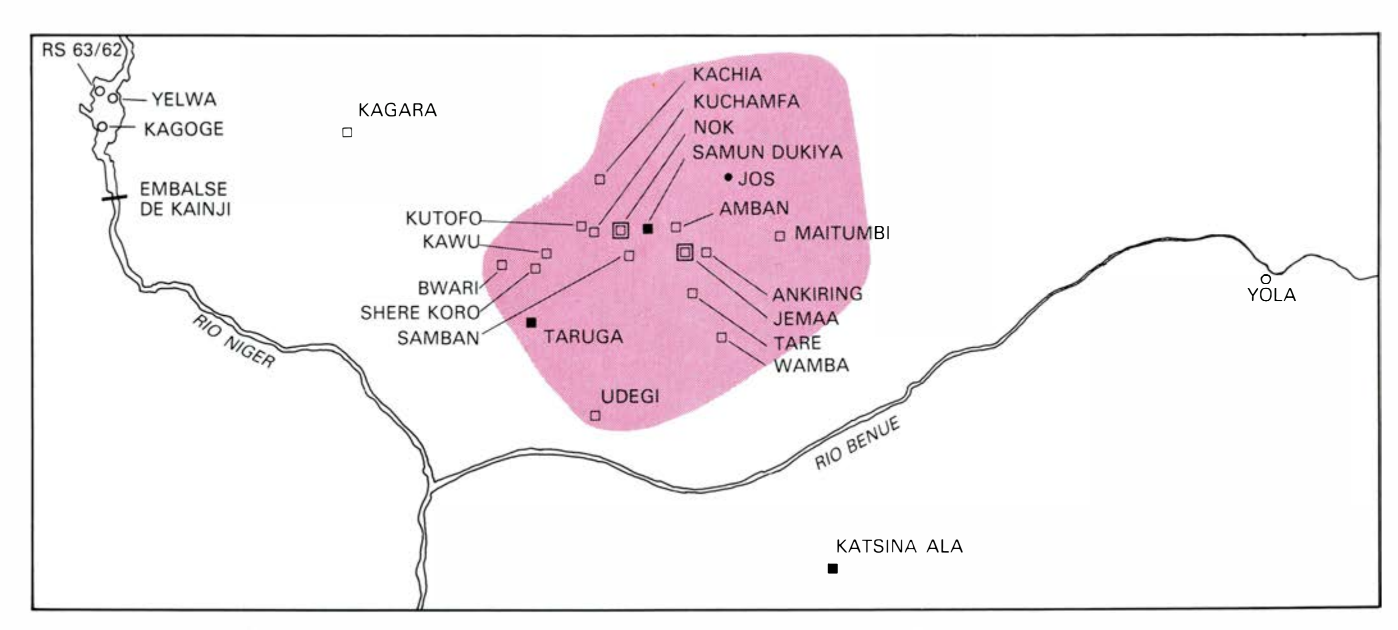
incluso se las vuelve a enterrar en bosquecillos sagrados.

El área de Nigeria central, donde se ha encontrado la escultura del estilo Nok, se extiende en la actualidad desde Kagara, hacia el este, hasta la llanura de Jos, y desde Kachia, en el norte, hasta Katsina Ala, en el sur. La mayor concentración de hallazgos sigue estando alrededor de Nok y de Jemaa; entre ellas dos se reparten tres cuartas partes de las terracotas descubiertas hasta la fecha. Cabría pensar que esta distribución no refleja tanto la situación del área donde las esculturas se tallaron en su origen cuanto la situación de las explotaciones de estaño que han puesto tantas al descubierto. No es ese el caso; ha habido hasta ahora una gran actividad en la minería de estaño en la meseta de Jos y las excavaciones han estado



CABEZA DE TERRACOTA, de 10,5 centímetros de alto. Fue hallada en los depósitos aluviales portadores de estaño de Jemaa, al este de la meseta de Jos. Estaba enterrada a unos cuatro metros bajo la superficie. La cabeza, esférica, muestra el arranque del pelo característico del estilo de Nok, que cruza la parte alta del cráneo de una oreja a otra. Los pelos del bigote están indicados por medio de incisiones y parte de la barba se ha perdido por rotura.

LA ESCULTURA NIGERIANA, desconocida fuera de Africa hace un siglo, se hizo famosa a raíz de los contactos europeos con Nigeria meridional, primero en Benin y después en Ife y en Igbo-Ukwu. Ahora sabemos que las esculturas de terracota más antiguas se encuentran cerca de la meseta de Jos.



MAPA DE LOS YACIMIENTOS de las terracotas del estilo Nok. Los cuadrados dobles de Nok y Jemaa indican que se han hallado grandes cantidades de esculturas en los depósitos de estaño en ambas zonas. Un cuadrado sencillo señala el descubrimiento de una o más esculturas en otros lugares de Nigeria central. Tres yacimientos (*cuadrados negros*) han sido excavados. Uno de ellos, Katsina Ala, señala el descubrimiento más meridional hasta la fecha de terracotas de estilo Nok. Kachia es el punto más septentrional de su aparición y Kagara el más occidental. La región de las minas de estaño está representada en color. Tres yacimientos en el curso del río Níger al oeste y un yacimiento, Yola, al este han proporcionado terracotas primitivas, pero no del estilo Nok.

continuamente vigiladas en busca de hallazgos arqueológicos. Pero en estas minas sólo se ha producido un descubrimiento que, además, no corresponde al estilo típico de Nok.

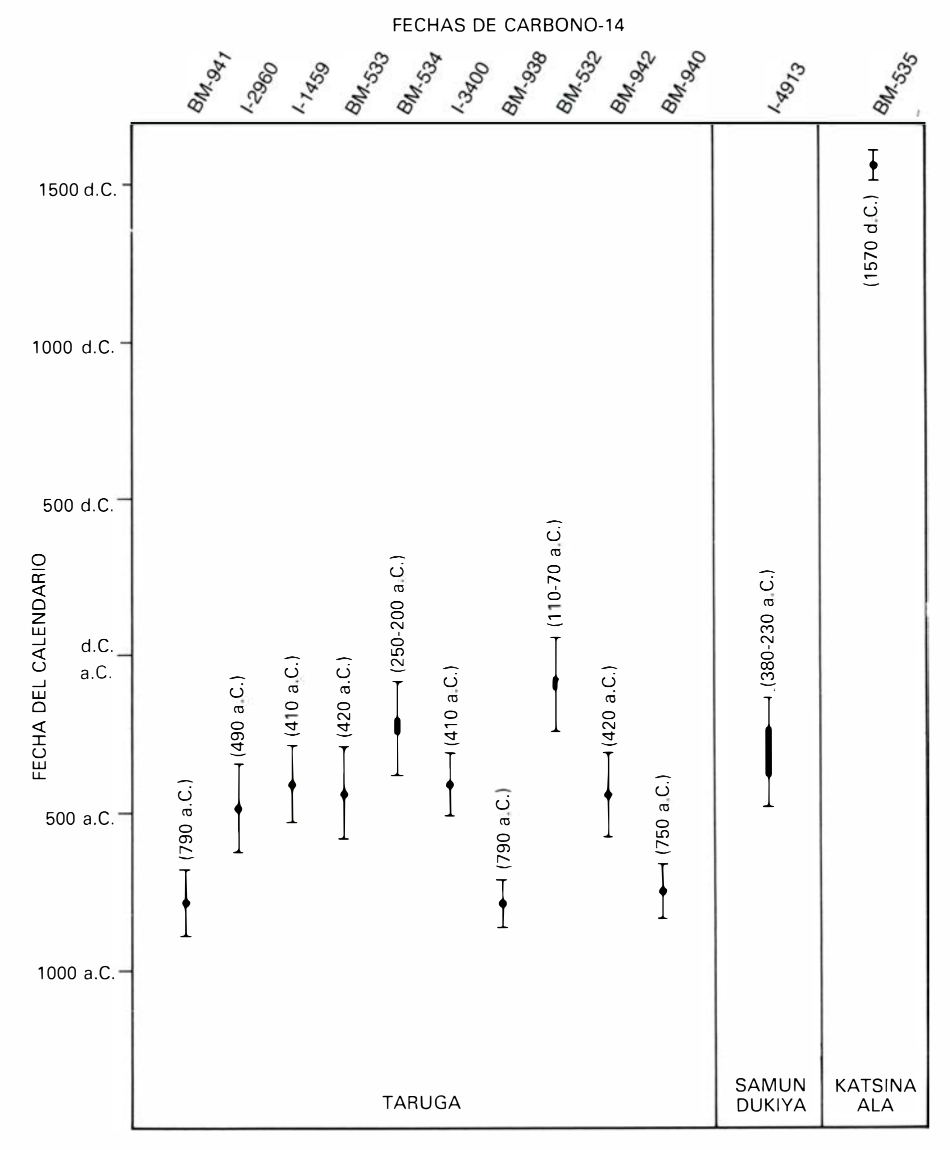
Por ello parece bastante seguro que los hacedores de las terracotas del estilo Nok vivían instalados, preferentemente, no en la meseta de Jos, sino por debajo de ella. Al mismo tiempo, los hallazgos que rodean el perímetro del mapa de distribución son en su totalidad hallazgos casuales en contextos no mineros; esto pudiera ser indicio de que todavía queda mucho por sacar a luz en la zona comprendida entre el perímetro actual y la región minera de Nok-Jemaa. Ciertos límites ya son, sin embargo, evidentes. Por ejemplo, la arqueología de urgencia, puesta en acción en el valle del río Níger antes de la terminación de la presa de Kainji, proporcionó estatuas de terracota que son aparentemente contemporáneas de las figuras de Nok. Su estilo, sin embargo, difiere del Nok.

¿Cómo se puede definir el estilo Nok? En primer lugar, contemplemos la variedad física manifiesta entre las doscientas y pico esculturas conocidas en este momento. Alrededor del diez por ciento del total son figuras de arcilla, pequeñas y macizas, que estuvieron, o aún están, aplicadas a vasos cerámicos; el grueso de ellas representan a seres humanos, pero una por lo menos representa a un animal. Sin embargo, la mayoría de las esculturas restantes, con mucha diferencia, son figuras exentas y de una variada serie de tamaños. Hay unas cuantas todavía enteras; una de ellas, una figura humana arrodillada, de 10 centímetros de altura, se halla a un extremo de la escala de tamaños. En el otro extremo, el tamaño de algunas cabezas (la parte de la figura que ha sobrevivido en la mayor parte de los casos) y de algunos trozos de piernas indican que las mayores figuras completas no pueden haber medido menos de 120 centímetros de altura.

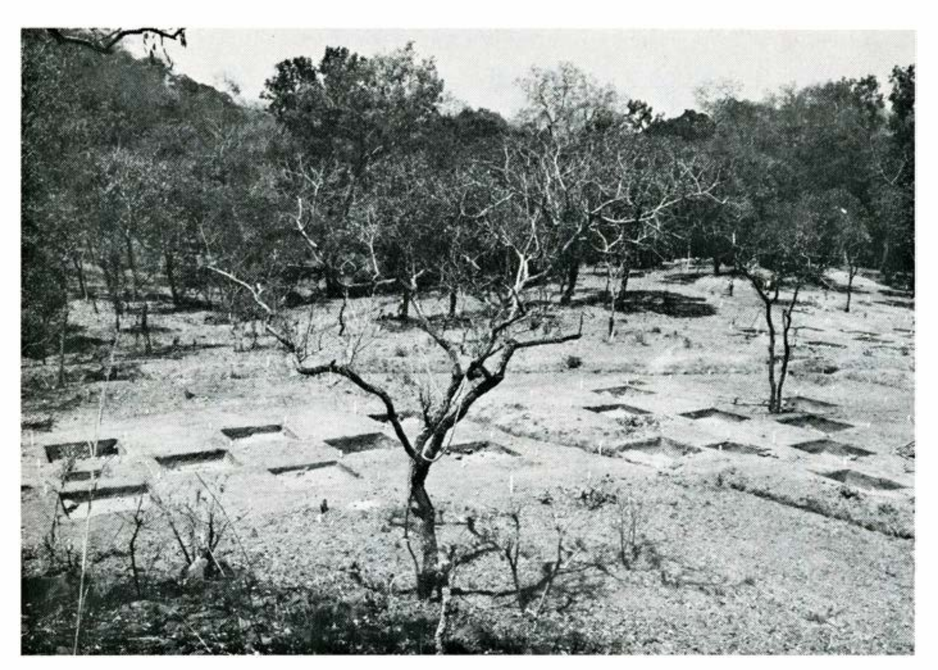
Casi todas las figuras exentas están huecas; sólo algunas de las más pequeñas son macizas. Las paredes de la mayoría de las figuras huecas tienen menos de un centímetro de espesor. La pasta se compone de una masa de arcilla con partículas de cuarzo, mica, granito u otros materiales "degrasantes" apropiados. Y así sigue ocurriendo en mucha cerámica moderna nigeriana que no esté hecha en el torno de alfarero. La ventaja de esa pasta es que se puede cocer en un intervalo de dos horas en una hoguera descubierta y a una temperatura no superior a la de 800 grados Celsius, siempre y cuando se haya precalentado para eliminar los residuos de la humedad de la arcilla. Tal continúa siendo la práctica de cocción actual de mucha de la cerámica de Nigeria, y no hay duda de que los artesanos de Nok empleaban el mismo método.

Las fracturas de las terracotas revelan que las partes cilíndricas de algunas de las estatuas fueron hechas enrollando tiras de arcilla a modo de cuerdas; la pared de una vasija hecha por el procedimiento del enrollado se consolida después aplicando presión simultáneamente a la arcilla blanda por dentro y por fuera. Otras fracturas indican que ciertos rasgos externos de las esculturas, por ejemplo las trenzas y adornos tales como cuentas, brazaletes y collares, eran modelados a veces por separado y después unidos al cuerpo. También algunas partes del cuerpo como la cabeza, el torso y las extremidades se modelaban a veces independientemente y se unían luego.

Los escultores Nok solían seguir la tradición africana de modelar la figura humana con la cabeza aumentada, fuera de la proporción normal; la relación del tamaño de la cabeza con respecto al del cuerpo es de uno a tres o a cuatro;



EPOCA DE LAS TERRACOTAS DE NOK, deducida indirectamente a través de las dataciones de la edad de muestras de carbón o de madera carbonizada de los yacimientos donde las estatuillas Nok se han encontrado. Aquí aparecen doce fechas de carbono-14 seleccionadas. La longitud de la línea negra indica el margen de error de cada cálculo. Las diez fechas del yacimiento de Taruga proceden de muestras de carbón asociadas con escorias o con fundiciones de hierro; el prefijo "BM" identifica los cálculos realizados por el Museo Británico y el prefijo "I" los efectuados por Isotopes Inc. Los resultados oscilan entre alrededor de 790 hasta el año 100 a.C. Una lectura de Taruga "BM" ha sido omitida por razones de escala; es la n.º 939: año 1640 d.C. La lectura de Samun Dukiya es de una muestra de madera extraída de la parte inferior del horizonte de ocupación. La muestra muy tardía de Katsina Ala, como la 939 de Taruga, indica que la muestra, de una masa de carbón del estrato de ocupación, estaba contaminada.



TERRAZA DE UNA HECTAREA Y MEDIA, estudiada en el valle de Taruga por Bernard E. B. Fagg, arqueólogo formado en Cambridge, cuando unos prospectores descubrieron dos terracotas del estilo Nok. Después de que una exploración con magnetómetro mostrase muchas anomalías, se realizaron cuatro campañas de excavación que descubrieron escorias de hierro y otros testimonios de fundición de hierro.

esa razón se da en la naturaleza en una proporción de uno a siete o a ocho. Parece también que la forma y los rasgos no siempre eran únicamente resultado de una labor de modelado. En ocasiones, la arcilla, quizá después de secada parcialmente, se iba recortando hasta lograr el resultado apetecido. En efecto: algunas de las terracotas recuerdan la técnica del tallista de madera que primero esboza algunos rasgos salientes y posteriormente les da el acabado oportuno.

El arte es siempre simbólico en mayor o menor grado, y el arte africano también lo es en gran medida. Rara vez se ajusta el naturalismo a sus intenciones. Por tanto, no sorprende encontrarse con que las esculturas Nok muestran una serie de convencionalismos. Ya he citado la proporción antinatural del tamaño de la cabeza con respecto al tamaño del cuerpo. Tenemos otro ejemplo en la representación del ojo. Muestra, por lo regular, una forma triangular o parece el segmento de un círculo, con el párpado superior horizontal y el inferior siguiendo una curva descendente. Es menos corriente que sea el párpado superior el que aparezca ligeramente encorvado. La pupila se representa mediante una perforación circular, que alcanza el interior de la cabeza hueca; unas cejas en arco armonizan con la curva del párpado inferior. A veces, las cejas son tiras de arcilla aplicadas, que posteriormente fueron pellizcadas para hacerlas resaltar en arista. Se trata de convencionalismos de carácter casi universal en las terracotas Nok; incluso se respetan en las esculturas de animales, por ejemplo en la cabeza de un elefante.

Otros convencionalismos comprenden el de la frente despejada, consecuencia de situar –por lo general– el arranque del pelo en un arco vertical, que cruza la cabeza por lo alto de la misma, desde una oreja hasta la otra. El pelo se representa de varias maneras; entre los muchos peinados diferentes figuran el penacho y los moños, que no se diferencian mucho de los que se llevaban aún en partes de Nigeria hasta fechas recientes. Las barbas están a menudo representadas mediante salientes en arista, alrededor de la mandíbula. Los bigotes también aparecen, y hay una cabeza que lleva una perilla trenzada.

Las narices se modelan anchas y chatas. Fosas nasales grandes, como las pupilas de los ojos, se representan mediante perforaciones circulares. También por medio de perforaciones es corriente figurar las orejas, exageradas en ocasiones. Las bocas, por lo regular cerradas, poseen unos labios anchos y prominentes, claramente modelados.

Las cabezas humanas son esféricas, cónicas o cilíndricas. En algunos casos, la forma básica de la cabeza y del tronco es la de un cilindro, colocado oblicuamente encima de otro. Este es un convencionalismo conocido en otras escuelas del arte africano occidental. Se han encontrado unas cuantas "figuras de Jano", es decir, cabezas con dos caras contrapuestas. Los detalles del vestido y otros accesorios están cuidadosamente ejecutados, incluidos los cinturones y mandilones del pubis, tanto masculinos como femeninos. La impresión general producida por las terracotas en su mayoría es la de una gran confianza, por parte de sus autores, en la tradición que estaban manteniendo. Pese a la variedad de subestilos, hay una casi universal seguridad de línea y limpieza de superficie.

Una vez puesto en claro el hecho de que la mayoría de las terracotas de estilo Nok se encontraban en depósitos de



HORNO DE FUNDICION OVALADO, de 45 cm de ancho por 60 de largo. Es uno de los 13 excavados en Taruga. El yacimiento de Taruga es el de la más primitiva fundición de hierro de Africa occidental.

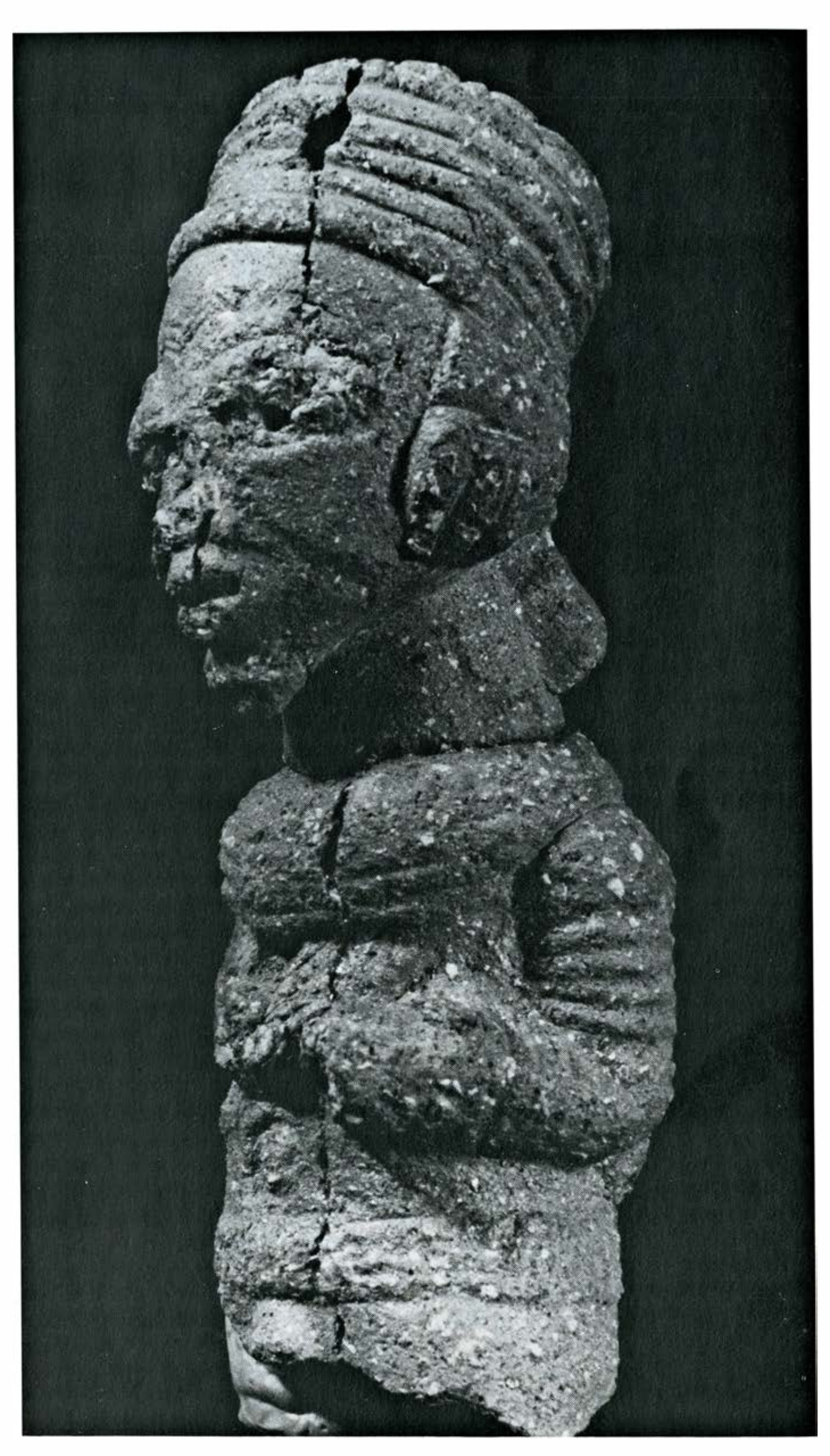
estaño aluvial y a profundidades de hasta 13 metros por debajo de la superficie, el personal del entonces llamado Departamento de Antigüedades desarrolló un programa tripartito. En primer lugar, emprendió la recogida de artefactos no escultóricos, principalmente tiestos de cerámica y utensilios de piedra, descubiertos en las mismas graveras aluviales. En segundo, se hicieron estudios de la estratigrafía y geomorfología de los depósitos de estaño. Y en tercero y más importante lugar, se trató de determinar la edad de los depósitos y de los artefactos aparecidos en ellos.

Entre los artefactos no sólo había tiestos y hachas de piedra, sino también otras piezas de barro cocido. Estas fueron identificadas como probables partes de paredes de hornos y como toberas, o tubos de ventilación, de hornos de fundición de hierro. Además de todo ello, había hachas y otros objetos hechos de hierro, cuentas de estaño, trozos de cuarzo y cilindros acabados en punta, labrados en cristales de cuarzo, que habían servido probablemente de pasadores de adorno de labios, orejas o narices. Este muestrario indujo a la cauta sugerencia de que los diversos artefactos, incluidas las esculturas, pertenecían a una época de transición en que los instrumentos de piedra se estaban sustituyendo por los de hierro, si bien ambos materiales se hallaban todavía en uso. Se requería cautela, por el hecho de que objetos de edades muy distintas pueden ser entremezclados por las corrientes de agua hasta terminar en un mismo depósito aluvial.

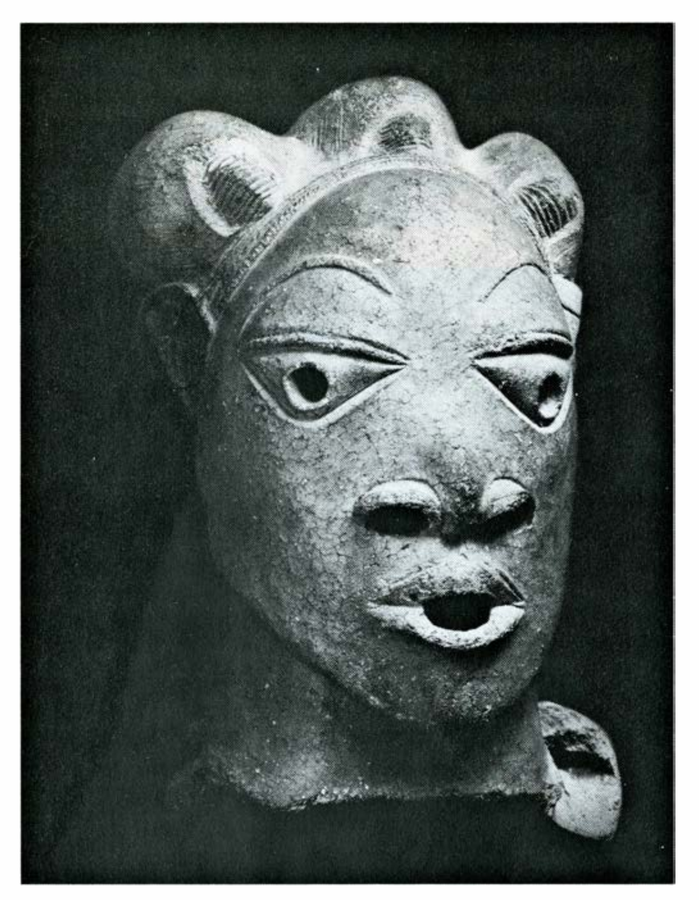
Se suponía que los depósitos se habían acumulado en una época en que la pluviosidad era mayor de lo normal, y por ende fueron atribuidos a la última fase húmeda de un sistema de "pluviales" e "interpluviales". En la década de los años cuarenta se creía, a partir de los datos de Africa oriental, que estos períodos tenían vigencia en todo el continente y que se habían correspondido, en cierta medida, con los períodos glaciales e interglaciales de la época pleistocena en las latitudes nórdicas. Sobre esta base, los depósitos de Nok fueron atribuidos a algún momento del último medio milenio a.C.

A raíz de trabajos geomorfológicos más detallados, realizados en varias partes de Africa, y de una mayor comprensión de los cambios climáticos del pasado, se ha puesto en claro que el sistema pluvial-interpluvial era demasiado simplista. Por ello fue curioso comprobar, una vez que surgió el método de datación por el carbono-14, en la década de los cincuenta, que las determinaciones de este isótopo del carbono señalaban el mismo medio milenio a.C. como época en que la mayoría de las esculturas Nok habían sido fabricadas. Los datos geomorfológicos habían dado la respuesta acertada, aunque por motivos erróneos.

Suponen algunos que el profundo enterramiento de los artefactos no ha sido tanto el resultado de un clima excepcionalmente húmedo como lo fue de las



TOSCA ESTRUCTURA de algunas terracotas de Nok, como se pone en evidencia en esta figura rota, pero casi completa, representada con un gorro, un cinturón y quizá brazaletes. La figura, que mide 16,5 centímetros de altura, es una de las varias encontradas durante las operaciones mineras de Nok.





CABEZA de tamaño natural, de 35 centímetros de altura, hallada en Nok en 1954. Tres sartas de cuentas o de fibras trenzadas elevan la línea del pelo.

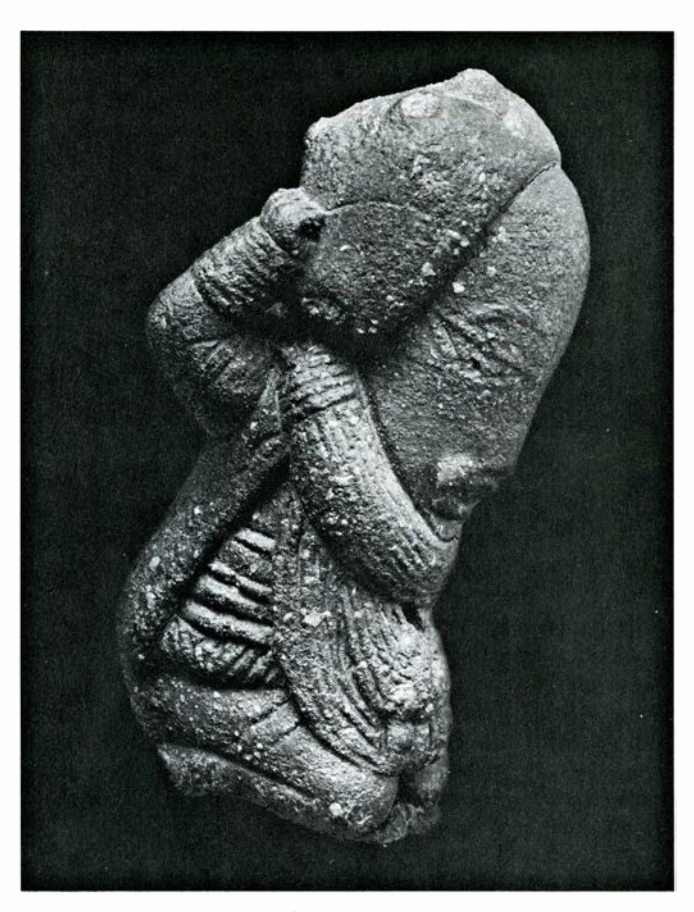


FIGURA ARRODILLADA, de 10,5 centímetros de alto, hecha de terracota maciza. Hallada cerca de Bwari, pudo haber sido un colgante o un amuleto.

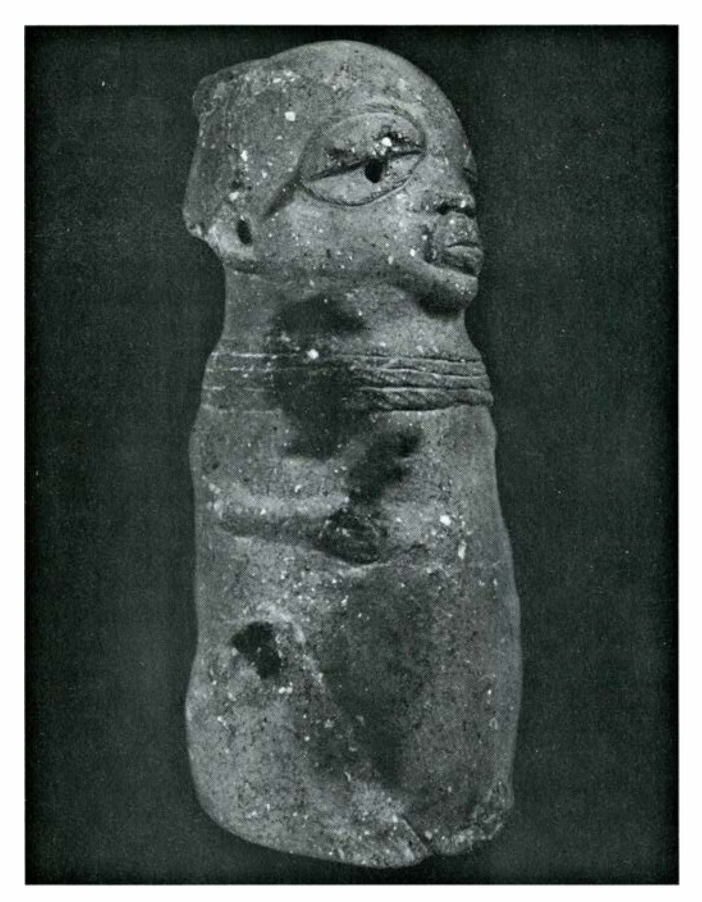
actividades de los propios habitantes anteriores a la Era Cristiana. La hipótesis sugiere que los autores de las esculturas Nok estaban en pleno uso del hierro y que sus actividades de limpieza de tierras y tala general de árboles, asociadas tanto con la agricultura como con la obtención de carbón de leña para las fundiciones de hierro, redundó en una extensa erosión de la superficie. De ahí pudo ocurrir que los factores humanos se combinasen con los climáticos para producir las condiciones que enterraron las terracotas de Nok.

La sospecha de que en el depósito aluvial se hallasen mezclados materiales de distintas épocas se vio plenamente confirmada cuando se obtuvieron, en 1957, las primeras fechas de carbono-14, a partir de madera carbonizada de Nok. Se tomaron tres muestras de un solo depósito aluvial. La primera procedía de la gravera portadora de estaño del nivel principal, donde se habían encontrado las terracotas. La segunda venía de una mezcla de arena y grava superpuesta a aquel nivel; y la tercera, de la arena situada por encima de esta otra capa. Sus fechas, calibradas, eran respectivamente 4450-4400 a.C., 2800-2690 a.C. y 1100 a.C. Una cuarta muestra, de madera con la corteza adherida, hallada en un nivel de arcilla negra, superpuesta a todas las arenas y gravas, fue datada en 210 d.C. Los resultados sólo autorizaban una conclusión relativa: las terracotas de este particular horizonte habían sido hechas probablemente antes del siglo III d.C., pero sin que hubiese seguridad alguna de cuánto tiempo antes de esa fecha.

En los años transcurridos desde estos primeros análisis, otras fechas obtenidas por el método del carbono-14, a partir de muestras de contextos no aluviales, han contribuido a precisar más la época del material de Nok. Por ejemplo, de las muestras de carbón vegetal asociadas con fundiciones de hierro en el valle de Taruga, tres corresponden al siglo VIII a.C. y cinco al siglo V a.C.

Lo que hacía falta para confirmar la relación entre las esculturas de Nok y los otros utensilios encontrados en los depósitos aluviales en que podían hallarse entremezclados era la excavación controlada de material de Nok en un yacimiento no aluvial. La primera oportunidad de hacer esta excavación la deparó la ampliación del campo de juego de una escuela de Katsina Ala, al sur del río Benue, muy lejos de la zona donde se extrae el estaño. Allí fueron halladas una cabeza de terracota y fragmentos de tres figuras grandes, todas ellas sentadas en taburetes. Cuando se abrió una trinchera para una cañería, tres años después, aparecieron cuatro cabezas más de terracota. Y ya cuando al fin el Departamento de Antigüedades emprendió unas excavaciones rigurosas en 1963, surgió una sexta cabeza. Aunque se ha dado noticia de una fecha de carbono-14, los pormenores de esta excavación aún no se han publicado. La muestra fechada procedía de una masa de carbón que se decía estaba "en el nivel de ocupación de la cultura de Nok". La fecha caía a mediados del siglo XVI d.C., indicando que o bien el carbón vegetal se había contaminado o que la estratigrafía se había alterado.

El único yacimiento de un poblado antiguo conocido en el valle de Nok fue descubierto por la hija de Fagg, Angela, también ella arqueóloga profesional, en Samun Dukiya en 1969. En este lugar asoman del suelo algunas rocas. Según parece, y como aún hoy es costumbre generalizada, los habitantes



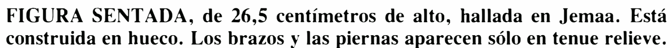
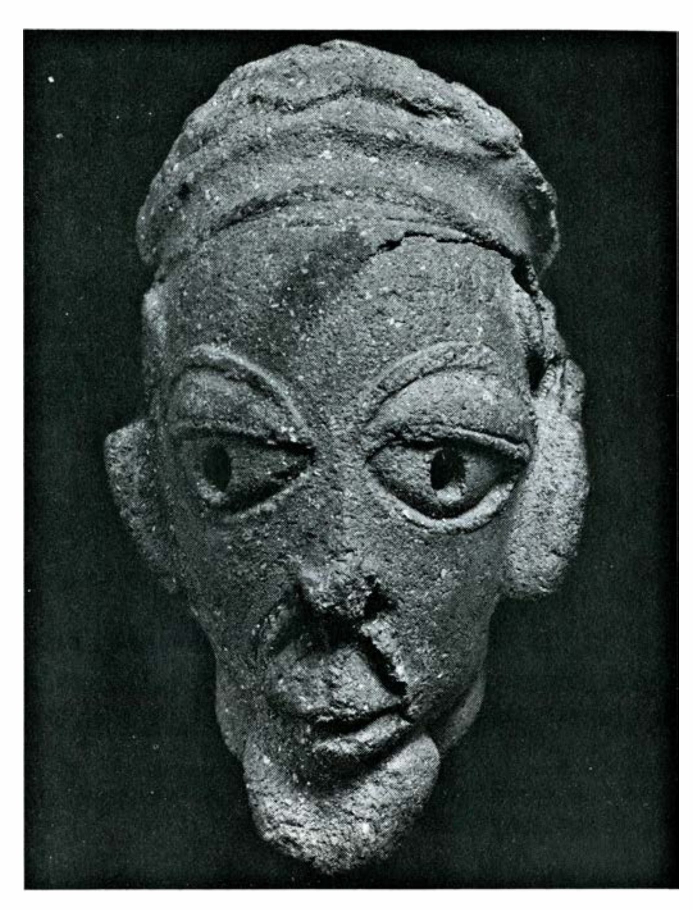


FIGURA SENTADA, de 26,5 centímetros de alto, hallada en Jemaa. Está construida en hueco. Los brazos y las piernas aparecen sólo en tenue relieve.



CABEZA DE HOMBRE, de 21 centímetros de altura. Lleva bigote, barba y trenzas bajándole por cada una de las mejillas. Fue recuperada en Nok.

prehistóricos habían construido sus chozas encima de las rocas. Restos de la ocupación se acumulaban en el suelo alrededor de las mismas a medida que artículos diversos caían o eran arrojados desde arriba. Angela Fagg excavó este depósito como representante del Departamento de Antigüedades. Además de fragmentos de estatuillas de terracota, se encontró con abundantes fragmentos de cerámica, afiladeras y mazas, cuentas de piedra, pasadores de labios y muchos trozos de hierro: ganchos, brazaletes, cuchillos rotos, puntas de flechas y de lanzas y un listón de hierro retorcido al que se había dado forma cilíndrica. En un vaciadero muy denso de tiestos de cerámica encontró un hacha de piedra en unión de una piedra grande, surcada de incisiones someras. Los surcos podrían haberse formado al pulir y afilar hachas de piedra. Llegó a la conclusión siguiente: aunque los habitantes del lugar poseían hierro, todavía hacían y empleaban hachas de piedra. Una muestra de carbón vegetal, de la parte inferior de los escombros acumulados, proporcionó una fecha calibrada de carbono-14, de los años 380 a 230 a.C.

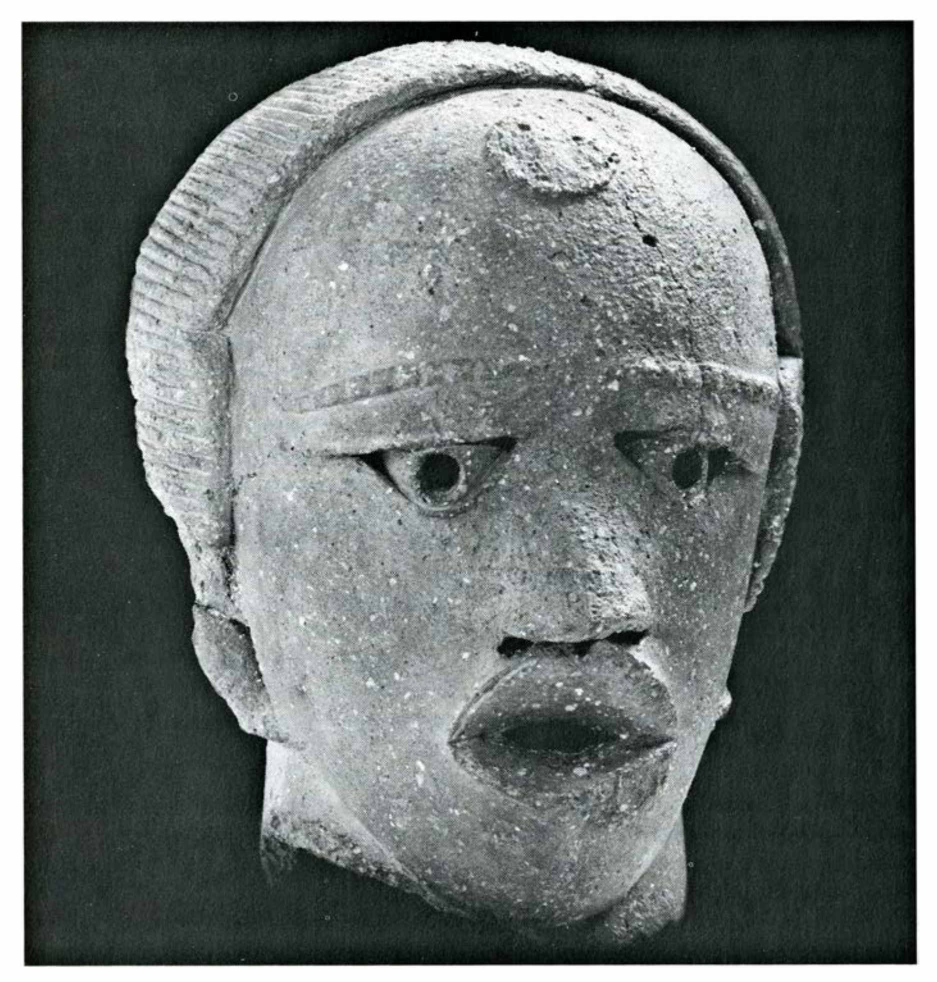
Otra ocasión de analizar una estación Nok surgió cuando unos prospectores que exploraban el lejano valle de Taruga, a unos 100 kilómetros al suroeste de Nok, descubrieron dos figuras de terracota; cada una de ellas representaba a una mujer sentada en un escabel, sujetándose los pechos. Al inspeccionar el lugar del descubrimiento, Bernard Fagg se convenció de que las terracotas habían estado situadas en terreno no perturbado. Se puso a excavar; abrió unas calicatas que no sólo proporcionaron pruebas de habitación, sino también escorias de hierro y toberas de hornos, signo de que el valle había sido escenario de actividades metalúrgicas.

El yacimiento era una terraza llana, de una hectárea y media de extensión, entre dos arroyos tributarios del río Takushara. Como preámbulo de la plena excavación, la zona fue examinada con el magnetómetro de protones, en busca de anomalías que pudieran señalar depósitos de metal. Fueron localizadas de hecho unas 60 anomalías, y todas ellas investigadas en el curso de cuatro campañas de excavación, entre 1960 y 1969. De las 60 anomalías, 20 resultaron ser debidas a la concentración de escorias de hierro. Muchas de ellas conservaban restos de hornos de fundición y 13 fueron excavadas. Todas eran hornos de pozo de poca altura, hechos excavando un agujero hasta unos 30 centímetros de profundidad. Algunos restos de las paredes del horno sobresalían unos 20 centímetros sobre el nivel de la superficie antigua. Cuando los hornos estuviesen intactos, medirían probablemente un metro o más de altura. La fundición más pequeña tenía 36 centímetros de diámetro a nivel del suelo y, la mayor, 105 centímetros. Se descubrieron también toberas de los hornos, pero ninguna de ellas estaba en su sitio; es de suponer que hubiesen formado parte de las paredes que se habían derruido.

Además de los restos de los hornos de fundición, las excavaciones de Taruga proporcionaron unas cuantas terracotas. Una de ellas es una figurita de Jano maciza. Otra, una pieza fragmentada hueca, el brazo derecho y torso de una figura que estaba probablemente fragmentada y puede haber medido 80 centímetros de alto. Una tercera también es un fragmento: una cabeza casi cilíndrica, colocada oblicuamente, al modo típico de Nok, sobre un torso cilíndrico roto.



EL PRIMER DESCUBRIMIENTO. Esta cabeza de terracota, de 10 centímetros de alto, fue hallada en una mina de estaño en 1928 y donada al museo del Departamento de Minas, en Jos (en Nigeria central). Al principio considerada efigie de un mono, constituye probablemente la representación de un ser humano. Dado que la mina se encontraba próxima a la aldea de Nok, tanto esta cabeza como las doscientas y pico terracotas de estilo similar halladas desde el año 1928 reciben todas ellas la denominación de Nok.



CABEZA CON LA BOCA ABIERTA, de 22 centímetros de altura. Fue hallada en una mina de estaño cerca de Jemaa, en 1943, y donada también al Museo de Jos. Fagg, al advertir las semejanzas entre éste y el primer descubrimiento, empezó a investigar lo que desde entonces se ha definido como estilo Nok.

Parece sumamente probable que las fundiciones de hierro asociadas con las terracotas de estilo Nok en Taruga se hallasen funcionando preferentemente desde el siglo V al III a.C. Este es el testimonio más antiguo que se conoce de la fundición del hierro en el oeste de Africa. Si la metalurgia del hierro no fue inventada independientemente al sur del Sáhara, su tecnología hubo de ser importada; pero, ¿de dónde? Hay grandes hacinamientos de escorias de hierro en Meroe, en la república del Sudán, y estuvo muy generalizada la hipótesis de que la tecnología del hierro penetró desde allí en la región. Sin embargo, las profundas investigaciones de los últimos años indican que la industria del hierro a gran escala de Meroe sólo se remonta a los primeros siglos de la Era Cristiana y se utilizaba hornos de tipo romano de los que la escoria se extraía por derretido. Los hornos de Taruga no sólo son más antiguos, sino que la escoria no podía derretirse en ellos. Parece, por tanto, más probable que la técnica de Taruga derive en última instancia del Africa del Norte cartaginesa.

¿Qué función desempeñaban las terracotas Nok? El espectador moderno puede valorar estas notables figuras por razones estéticas; pero es muy poco probable que sus creadores tuviesen en su mente propósito alguno estético, o que juzgasen su obra por patrón que nos resulte familiar. Como antes he dicho, el arte africano es intensamente simbólico. ¿Qué simbolizan, entonces, las figuras Nok? En 1977, el Museo Nacional de Lagos publicó un tomo escrito por Bernard Fagg que contiene fotografías en color y en blanco y negro de las 150 figuras Nok más importantes que se conocían entonces. (Fagg tuvo la amabilidad de proporcionar muchas de las ilustraciones de este artículo.) El estudio de esta importante obra es el preámbulo necesario para responder a cualquier pregunta acerca de la función. Pero si uno ha de sopesar objetivamente todos los datos de que nos es dado disponer, será necesario poder contar con memorias detalladas de las excavaciones, incluidas descripciones de los yacimientos donde las figuras fueron encontradas y con los análisis realizados por diversos especialistas. Todo esto se nos promete en un segundo tomo.

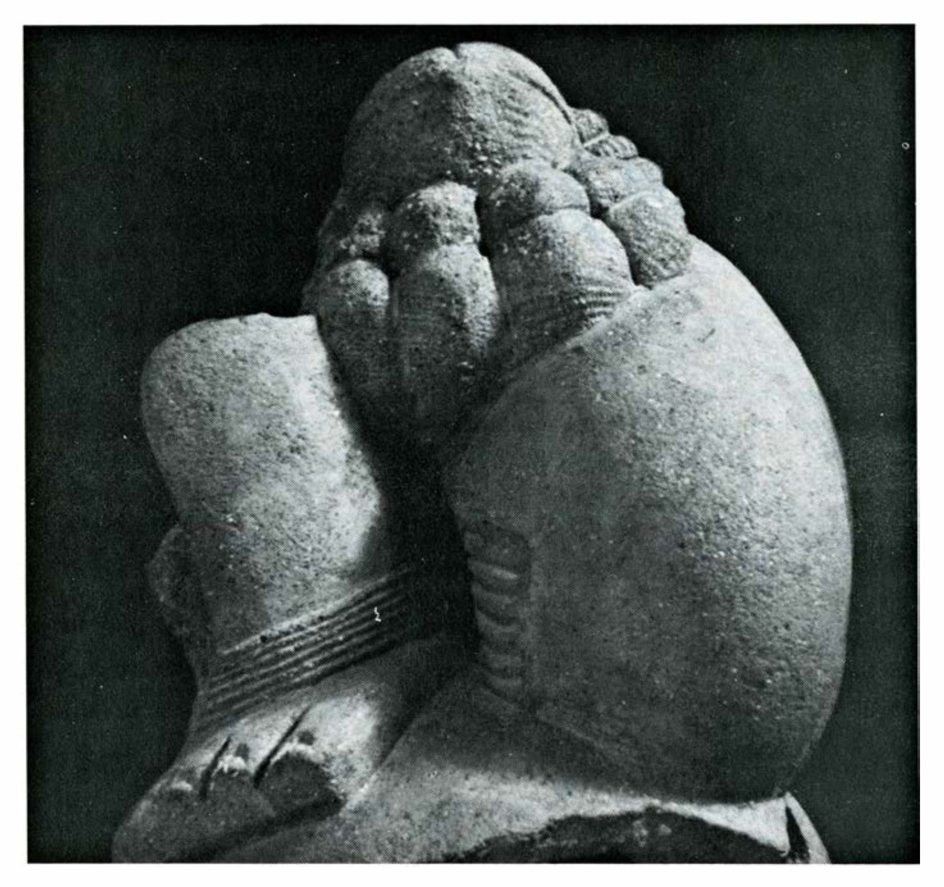
Hasta que llegue ese momento, todos los hechos con que contamos como base para adivinar la posible función de estas figuras son los siguientes. En primer lugar, la mayoría de ellas de-

ben de haberse hallado originariamente en lugares donde se podían incorporar fácilmente a los depósitos aluviales de la minería del estaño. En segundo, algunas estaban asociadas con un lugar de habitación (Samun Dukiya). En tercero, otras estaban asociadas íntimamente con hornos de fundición de hierro (Taruga). Por último, las circunstancias que rodean el descubrimiento de seis cabezas Nok y otros fragmentos de Katsina Ala sugieren, aunque no haya pruebas positivas de ello, que pueden haber ocupado un santuario en un bosque sagrado.

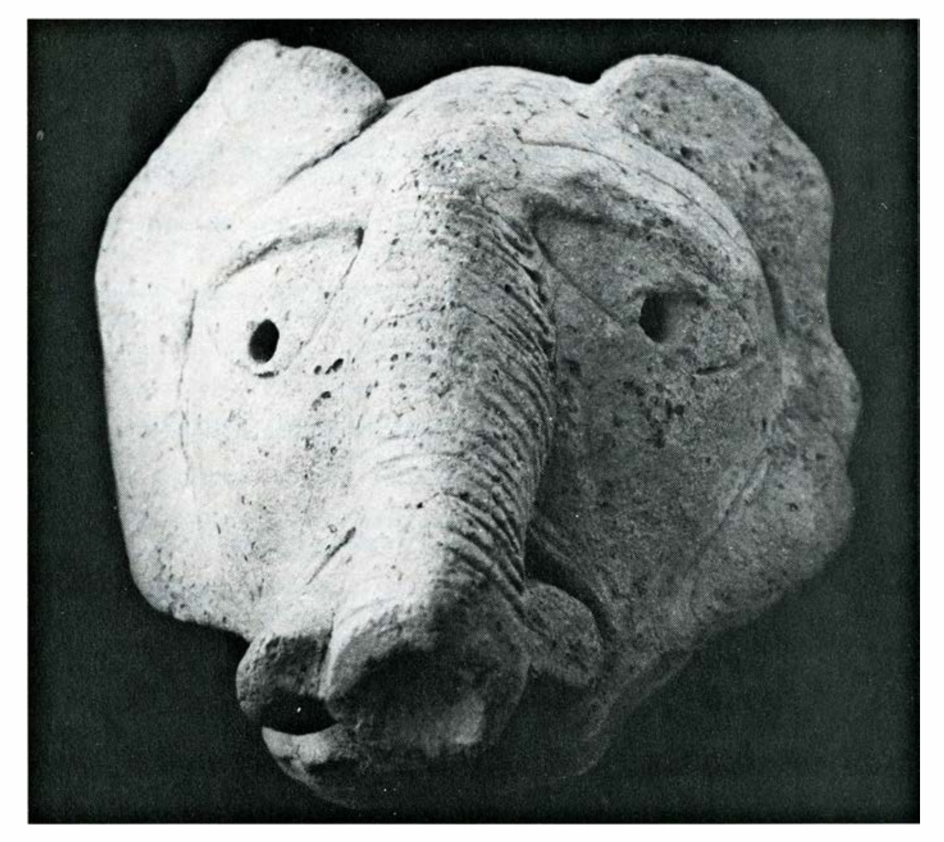
Lo que las terracotas dicen por sí mismas, correctamente interpretado, puede servir de ayuda para sugerir qué función desempeñaban. Dentro de este tipo de información se encuentra el carácter y el grado de estilización de las figuras, la postura de las mismas, la proporción de los temas humanos respecto a los animales, y, entre los temas humanos, la proporción entre hombres y mujeres. El aspecto del tamaño también ha de ser tenido en cuenta. Por ejemplo, algunas figuras son muy pequeñas y están provistas de agujeros, como indicando que pudieron llevarse de colgantes o amuletos. La asociación de otras varias con el lugar de habitación de Samun Dukiya avala la hipótesis de que las figuras de peana circular, como una cazuela invertida, hayan podido ser el remate de la techumbre de brezo de una choza redonda. Aún se usan cazuelas de este modo en el país de Gwari, en Nigeria.

Parece probable que muchas de las figuras simbolizasen a fuerzas sobrenaturales con quienes sus autores deseaban manipular, por ejemplo, las relacionadas con el mantenimiento de las fuentes alimenticias. Así podría haber, pongamos por caso, un santuario situado en los campos de cultivo o cerca de ellos. Dentro de un sistema de cultivos desplazados cada vez que se desbrozase una zona para sembrarla, la erección de un nuevo santuario podría requerir el encargo de nuevas figuras. Los santuarios viejos podrían quedar abandonados a su suerte, de modo que cuando las aguas de la estación de las lluvias inundaban los valles, todo lo que había en ellos era arrastrado e incorporado a los depósitos aluviales de aguas abajo.

De modo similar es casi seguro que ritos mágico-religiosos acompañasen a los procesos técnicos de la fundición del hierro; quizá radique ahí el por·qué las terracotas están asociadas con los hornos de Taruga. Las hipótesis de este tipo se pueden multiplicar. ¿Es que por ventura las cabezas que parecen retra-



ESCULTURA ROTA mostrando la parte inferior de una figura que descansa en la rodilla izquierda y el pie derecho. Unas ajorcas adornan la pierna derecha; entre las dos piernas lleva un mandilón perlado cubriéndole el pubis. El fragmento mide 18,5 cm de altura. Otras figuras no acreditan tanto detalle.



CABEZA DE ELEFANTE con trompa y colmillos rotos. Demuestra el empleo del mismo convencionalismo para representar los ojos de un animal que el empleado para perfilar el ojo humano, hasta el extremo de poner cejas al elefante. Esta cabeza, que mide 14,3 centímetros de alto, fue hallada en Udegi.

tos de individuos muertos estaban asociadas a ritos destinados a alejar la enfermedad? ¿Guardaban las figuras de serpientes alguna relación con los cultos ofiolátricos que han estado tan extendidos en Africa Occidental? ¿Estaban las figuras de monos y de elefantes asociadas con ritos de caza? De momento, nada sabemos de cierto, y en ausencia de testimonios escritos siempre será difícil estar seguros. Sin embargo, ulteriores trabajos arqueológicos, encaminados a poner a prueba estas hipótesis, deberán hacer más probables en el futuro aquellas que resistan la prueba.

Por último, ¿podemos hablar de una "cultura Nok" en el sentido de V. Gordon Childe de una reunión de artefactos que se manifiesta repetidamente y que se puede presumir que sea expresión concreta de unas comunes tradiciones sociales? Bernard Fagg, el iniciador de estas investigaciones, sostiene que la semejanza artística de las terracotas es razón suficiente para considerar toda la colección como producto de una sola cultura. ¿Es suficiente el "estilo Nok" por sí solo para identificar una cultura en el sentido de Childe? Muchos arqueólogos son más precavidos y creen que no. Dejando de lado las dudas teoréticas mantenidas ahora por muchos prehistoriadores acerca del concepto exacto de "cultura" y de si las "culturas" se pueden identificar a través de los artefactos, su punto de vista es que aunque se puedan obtener pruebas que demuestren la existencia de la cultura de Nok, los datos de que actualmente se dispone son insuficientes para hacerlo así.

Cincuenta años atrás, los prehistoriadores europeos hablaban de una "civilización megalítica" y suponían que todos los distintos grupos europeos de monumentos antiguos de piedra derivaban en última instancia de una fuente común del Mediterráneo oriental. Ahora se cae en la cuenta de que varios grupos diferentes europeos desarrollaron independientemente una arquitectura que hacía uso de piedras grandes. La "civilización megalítica" sólo era una unidad en las mentes de los prehistoriadores. La situación de Nok no es precisamente análoga, pero quizá la historia del concepto de megalitismo pueda hacer sonar la alarma. Parece imprudente convertir una tradición artística común en una cultura hasta que (para emplear la frase de Childe) no hayan aparecido expresiones mucho más concretas de tradiciones sociales comunes.

Juegos matemáticos

La teoría de congruencias creada por Carl F. Gauss imponía sus módulos ya en 1801

Martin Gardner

"Erase una vez
un jovencito llamado Andrés,
quien contar sólo sabía módulo diez.
¿Qué haré –preguntar solía–
cuando los dedos agote de manos y pies?
¿Volver a empezar, tal vez?"

Los principios en que se funda la teoría de congruencias, que algunos llaman aritmética modular, son tan antiguos como la aritmética; pero hubo de ser el "príncipe de las matemáticas", el alemán Carl Friedrich Gauss (del que se ha dicho que ha sido el más insigne matemático que haya existido jamás), quien los recogiera y unificara, con notación tan compacta y potente que cuesta trabajo imaginar cómo hubiera podido progresar la teoría de números de no disponer de ella. Hijo de un albañil sin estudios, Gauss fue niño prodigio, cuyo libro más influyente, *Disquisitiones arithmeticae,* fue publicado a sus expensas en 1801, cuando contaba 24 años, a pesar de haberlo compuesto cuatro años antes. En esa obra introdujo, por vez primera, la noción de congruencia de números enteros.

En la definición de Gauss, dos números, a y b, son congruentes respecto a un módulo m (del latín *modulus,* medida pequeña) cuando su diferencia es divisible por el número entero no nulo m. Dicho con otras palabras, dos enteros son congruentes módulo m cuando al dividirlos entre m dan restos iguales. Para simbolizar la congruencia, Gauss usaba tres breves trazos paralelos horizontales, notación que se sigue empleando hoy: $a \equiv b$ (mod. m). La no-congruencia se expresa así: $a \not\equiv b$ (mod. m).

Por ejemplo, 17 y 52 son congruentes módulo 7, porque al dividirlos por 7 estos dos números dan resto 3. Dicho de otra forma, $52 - 17 = 35$, que podemos expresar como 7×5. Llamando k al multiplicador (en este ejemplo k es igual a 5), si a es el menor de ambos números, tendremos $b = a + km,$ siendo m el módulo y k un entero apropiado. La mayoría de las reglas de la aritmética ordinaria y del álgebra (tales como las de adición, sustracción y multiplicación) mantienen su validez al manejar congruencias.

Los restos producidos al ir dividiendo los números enteros entre el módulo se llaman residuos; para cada número m ($\neq 0$) usado como módulo, el conjunto de los enteros queda descompuesto en m "clases residuales". El mínimo de los módulos interesantes, 2, discrimina entre números pares y números impares. Todos los números pares son congruentes con 0 (módulo 2), y forman la clase residual infinita ..., -4, -2, 0, 2, 4,... Todos los números impares son congruentes con 1 (módulo 2), y forman la clase residual infinita ..., -3, -1, 1, 3,... Para $m = 3$ los residuos (o restos) son 0, 1 y 2. Hay tres clases residuales (mód. 3), cada una formada por infinitos números; y, análogamente, para valores superiores de m.

Como el propio Gauss mostró con toda claridad, el álgebra de congruencias permite dar demostraciones sencillas de las diversas reglas que caracterizan la divisibilidad de unos números por otros. (En todo el artículo, "número" significará "número entero".) Por ejemplo, un número n expresado en base 10 es divisible por 3 si y solamente si la suma de sus cifras es congruente con 0 (módulo 3). Análogamente, n es congruente con 0 (mód. 9), si y solamente si la suma de sus cifras es congruente con 0 (mód. 9). Un número es congruente con 0 (mód. 4), si y solamente si sus dos últimas cifras forman un número congruente con 0 (mód. 4); n es congruente con 0 (mód. 8), si y solamente si sus tres últimas cifras forman un número congruente con 0 (mód. 8). Un número es congruente con 0 (mód. 11), si y solamente si la diferencia entre la suma de sus cifras de lugar par y la suma de sus cifras situadas en lugar impar es congruente con 0 (mód. 11).

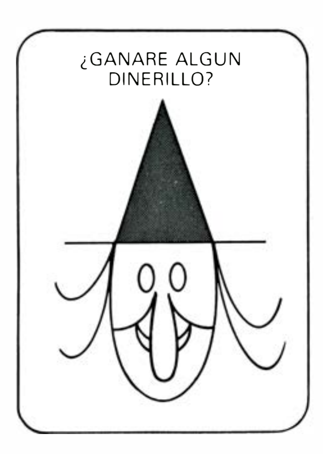
El álgebra de congruencias condujo a importantes teoremas sobre números primos y simplificó las demostraciones de otros ya conocidos. Por ejemplo, el "pequeño teorema" de Fermat, de gran utilidad para tantear si un número es primo, afirma que si p es un número primo y a constituye un número cualquiera no divisible por p, al elevar a a la $(p - 1)$-ésima potencia, el número obtenido da resto 1 al ser dividido por p. Con la terminología de Gauss, $a^{(p-1)}$ es congruente con 1 (mód. p). Así pues, es posible elevar un número a potencia una unidad inferior a un número primo tan grande que el resultado podría tener billones de cifras y rebasar con mucho la capacidad de todos los ordenadores, sabiendo no obstante que si le restásemos una unidad a esa cifra imposible de imprimir tendríamos un múltiplo del número primo p.

Otro conocido resultado que guarda también relación con el pequeño teorema de Fermat es el llamado teorema de Wilson. Si vamos multiplicando los números consecutivos a partir de 1, hasta alcanzar el precedente a un número primo $p,$ el producto será divisible por todos los números anteriores, pero no por $p,$ evidentemente. Sin embargo, sumándole una unidad a este producto, ¡oh maravilla! sí resulta un múltiplo de p. Por ejemplo, 1 por 2 por 3 por 4 es igual a 24, que no es divisible por el número siguiente, 5, que es primo. Pero 24 más 1 es igual a 25, que sí podemos dividir por 5. Sirviéndonos de las notaciones de factorial y congruencia, el teorema de Wilson será: $(p - 1)! + 1 \equiv 0$ (mód. p), para todo número primo p.

1. Sea Y el año. Se resta 1900 de Y. Llamemos N a la diferencia.
2. Se divide N entre 19. Llamemos A al resto de la división.
3. Se divide $(7A + 1)$ entre 19. Despreciamos el resto. Sea B el cociente.
4. Se divide $(11A + 4 - B)$ entre 29. Llamemos M al resto.
5. Se divide N entre 4. Se desprecia el resto. Llamemos Q al cociente.
6. Se divide $(N + Q + 31 - M)$ entre 7. Llamemos W al resto.
7. La fecha de la Pascua es $25 - M - W$. Si el resultado da positivo, caerá en abril. Si es negativo, caerá en marzo (interpretando 0 como 31 de marzo, -1 como 30 de marzo, -2 como 29 de marzo, y así sucesivamente, hasta -9, que es el 22 de marzo).

Procedimiento para calcular la fecha de la Pascua de Resurrección, para cualquier año, de 1900 a 2099, ambos inclusive



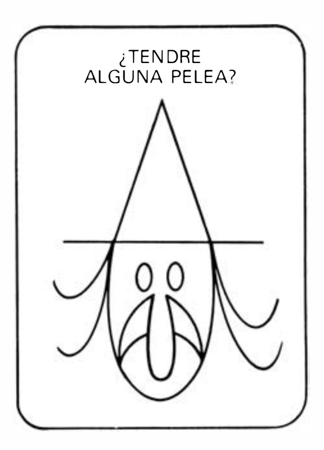












Naipes cartománticos de la Bruja Burlona

El teorema era ya conocido por Leibniz, pero fue redescubierto por un estudioso inglés, de nombre John Wilson. Alguien le atribuyó el teorema en un manual de álgebra acompañado de la observación de que nunca podría ser demostrado, pues en matemáticas no existen notaciones adecuadas para expresar números primos. Cuando así se lo dijeron a Gauss, éste lo demostró en cinco minutos, sin tan siquiera tomar asiento, comentando que para este tipo de demostraciones no se requieren *notationes,* sino *notiones*. El teorema de Wilson da una preciosa condición para comprobar el carácter primo de los números, pero desdichadamente no se presta a la búsqueda de grandes números primos con ayuda de ordenador.

Hay en teoría de números millares de teoremas importantes, cuyo enunciado puede expresarse concisamente y cuyas demostraciones pueden darse con brevedad y elegancia gracias a la teoría de congruencias. No serán menos los rompecabezas basados en tales teoremas. Supongamos, por ejemplo, que un fabricante de dados embala su producto en grandes cajas cúbicas que expide a los mayoristas. Para someter los dados a ciertos ensayos, uno de éstos retira del gran paquete cúbico una hilera de dados, que durante las pruebas quedan destruidos. Los dados restantes son empaquetados en cajas pequeñas, a razón de seis dados por envase. ¿Cuántos dados sueltos sobrarán? Sorprendentemente, poco importa el tamaño de las cajas del fabricante: no sobrará ninguno. Así se deduce de un teorema sobre congruencias, a saber, $n^3 - n = 0$ (mód. 6).

He aquí un problema que pone de relieve la fuerza del álgebra de congruencias. (Lo descubrí en el "Puzzle Corner" que firma Allan Gottlieb en *Technology Review,* mayo de 1978.) Se desea demostrar un curioso teorema, que afirma que todo número entero n tiene un múltiplo formado por una cadena de unos (1) seguida de una cadena de ceros (0). ¿Cómo abordarlo? Un procedimiento es enumerar n números "repet-unos", empezando por 1, 11, 111, 1111, y sucesivamente, hasta tener n números así. El número de restos posibles al dividir por n es, evidentemente, n. Añadamos otro repetuno más a nuestra lista. Por el principio de encasillamiento, habrá en esta lista al menos dos números que den iguales restos, esto es, que sean congruentes módulo n. Ahora, la diferencia de dos números congruentes módulo n es congruente con 0 (módulo n); es decir, esta diferencia es múltiplo de n. Por tanto, si al mayor de estos números repetunos congruentes le restamos el menor, resultará un número múltiplo de n y de la forma buscada.

Para ver todo esto con más detalle, busquemos un número de la forma 111... 0... que sea múltiplo de 7. Los ocho primeros repetunos son 1, 11, 111, 1111, 11111, 111111, 1111111 y 11111111. Sus residuos (mód. 7) son, respectivamente, 1, 4, 6, 5, 2, 0, 1 y 4. Puesto que hay ocho números, habremos de tener al menos dos con iguales residuos (mód. 7). En este ejemplo hay dos de tales pares. El par mínimo es 1 y 1111111, cuya diferencia es 1111110, o sea, 7×158730. Este es el mínimo número de la forma buscada.

En casi todas las culturas, la medida de tiempos se ajusta al sistema modular. Nosotros contamos las horas mediante la aritmética del módulo 12. Si ahora son las 3 de la tarde, y deseamos saber qué hora marcarán los relojes dentro de 1000 horas más, nos es suficiente sumar 3 con 1000 y dividir 1003 entre 12. La respuesta es que el reloj marcará las 7, resto de la división anterior. El reloj es tan conocido ejemplo de aritmética modular, que, al explicar las congruencias, los maestros suelen hablar de "aritmética de reloj". En las fuerzas armadas es corriente utilizar re-

000	Soñará Vd. con un pariente.
001	Tendrá Vd. una disputa por teléfono.
002	Soñará Vd. con elefantes.
003	Tendrá Vd. una agria conversación con un fontanero.
010	Encontrará Vd. un anillo perdido.
011	Vd. dirá algo que se volverá en contra suya.
012	Le parecerá que hace un tiempo detestable.
013	Esté prevenido, puede lastimarse un pie.
020	Soñará Vd. con una vieja amistad.
021	Sí, pero será una pelea que no empezará Vd.
022	Soñara Vd. con un avión.
023	No, si consigue Vd. dominar su genio.
030	Encontrará Vd. una moneda en la calle.
031	Tan sólo un rasguño al afeitarse la cara o las piernas.
032	Encontrará Vd. un objeto olvidado en un bolsillo de un viejo albornoz.
033	No, pero herirá Vd. a otra persona.
100	No, porque la falsificación es ilegal.
101	Hará Vd. un viaje hasta una cafetería.
102	La cantidad habitual, nada más.
103	Hará Vd. un viaje corto hacia el sur.
110	Se prendará Vd. de un gato.
111	Quizás.
112	Se enamorará Vd. de un extraño en una lavandería.
113	De ninguna forma.
120	Recibirá por correo un talón bancario inesperado.
121	Viajará Vd. hasta el suelo... a causa de una piel de plátano.
122	No más de 100.000 ptas.
123	Visitará Vd. a un amigo que vive en otra ciudad.
130	Se enamorará Vd. de un nuevo automóvil.
131	Decididamente sí.
132	Perderá Vd. el seso por un agente de la propiedad inmobiliaria.
133	Pregunta tonta.
200	Soñará Vd. que es un pájaro.
201	Vd. *nunca* se meterá en líos.
202	Un sueño hará que Vd. se despierte a medianoche.
203	Tendrá Vd. una disputa con un viejo amigo.
210	Encontrará Vd. una llave que perdió.
211	No sufrirá ninguna clase de daño durante los siete próximos días, pero ponga cuidado el octavo.
212	Descubrirá Vd. algo desagradable en su cama.
213	Esté atento, no vayan a darle un puñetazo en la nariz.
220	Soñará Vd. con pasteles de almendra.
221	Procure no tener discusiones en el autobús.
222	Soñará Vd. con un platillo volante.
223	Tenga cuidado de no enfrentarse a nadie llamado López.
230	Encontrará Vd. intrigante este acertijo.
231	Esta semana es peligroso subirse a escaleras de mano.
232	Encontrará Vd. preocupantes las noticias de mañana.
233	Subir a pie las escaleras puede ser peligroso.
300	Sí, un montón de dinero.
301	No saldrá Vd. de su barrio en toda la semana.
302	Por el contrario, *perderá* Vd. algún dinero.
303	Hará un viaje maravilloso... con la imaginación.
310	Para variar, esta vez no se enamorará de nadie.
311	Tanto puede Vd. contestar a eso como yo.
312	Se liará Vd. con alguien relacionado con los espectáculos.
313	¿A quién se cree Vd. que le está tomando el pelo?
320	Sí, pero casi todo se lo quedará Hacienda.
321	Sí, pero el viaje no le gustará.
322	Un poco, pero se lo gastará inmediatamente.
323	Hará Vd. un largo viaje en avión.
330	Se enamorará Vd. dos veces.
331	No lo sé.
332	Se *des*enamorará Vd.
333	Debería darle vergüenza hacer una pregunta así.

Respuestas de la Bruja Burlona

lojes de 24 horas. Los días de la semana se ajustan a la aritmética de módulo 7; los meses del año, al módulo 12, y los años del siglo, al módulo 100.

Muchos problemas relativos al calendario ceden fácilmente frente al instrumental de congruencias. El propio Gauss dio algoritmos para calcular la fecha de la Pascua de Resurrección. Según los evangelios, la resurrección de Jesús se produjo en la mañana del domingo de la semana pascual hebrea, que se celebraba tras la primera luna llena de primavera. Los primeros cristianos quisieron conservar la relación simbólica entre los sacrificios pascuales y el sacrificio de Cristo, y así, en el Primer Concilio de Nicea (325 d. de C.) se decidió que la pascua cristiana habría de celebrarse el primer domingo siguiente a la primera luna llena que se produjera tras el equinoccio vernal. Desdichadamente, el antiguo calendario juliano atribuía al año una duración excesiva, ligeramente mayor que la verdadera, con lo que la fecha del equinoccio vernal se iba deslizando hacia los meses de invierno. Hacia 1582, el equinoccio se acercaba ya peligrosamente al mes de febrero. Cuando el Papa Gregorio XIII introdujo en 1582 el calendario moderno, lo hizo, sobre todo, para devolver a los meses de primavera la fiesta pascual. No deja de ser triste que, en la Edad Media, una de las aplicaciones más importantes de las matemáticas a la naturaleza fuese la determinación de las fechas exactas del domingo de resurrección.

Los algoritmos de Gauss para determinar las fechas de la Pascua, tanto para el calendario juliano como para el gregoriano, son complicados, y además es necesario parchearlos, añadiendo reglas que resuelvan las excepciones. No obstante, si nos conformamos con los dos siglos de 1900 a 2099, ambos inclusive, dispondremos de un procedimiento directo, sin casos excepcionales, preparado por Thomas H. O'Beirne, de Glasgow, quien lo dio a conocer en un artículo titulado "The Regularity of Easter" (*Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications,* vol. 2, n.º 2, págs. 46-49; abril, 1966). O'Beirne descubrió también que es posible aprender de memoria el procedimiento, y con ello asombrar a los amigos calculando la fecha de la pascua de cualquier año del período mencionado, haciendo mentalmente los cálculos.

Podemos ver un resumen del algoritmo de O'Beirne en la primera ilustración del artículo. La pascua cae en marzo o en abril. La fecha más temprana posible es el 22 de marzo. La última vez que así sucedió fue en 1818 (coincidien-

do con la luna llena) y no volverá a repetirse hasta el 2285. La fecha más tardía posible es el 25 de abril. Así ocurrió en 1943, y no volverá a suceder hasta el 2038. Quizá le agrade al lector poner a prueba el procedimiento de O'Beirne, y comprobar que da correctamente las fechas 6 de abril para 1980, 19 de abril para 1981 y 11 de abril para 1982. La fecha más frecuente de la pascua es el 19 de abril, seguida muy de cerca por el 18 del mismo mes.

Un sinfín de trucos de ilusionismo, especialmente con cartas o tarjetas numeradas, se basan en las congruencias; ya he descrito muchos en anteriores artículos. Un truco que no he analizado todavía se basa en que la suma de los valores de todas las cartas de la baraja francesa (de 52 naipes) es 364 = 0 (mód. 13). (Las sotas tienen valor 11, las reinas, 12, y los reyes cuentan con valor 13.) Haga usted que otra persona baraje el mazo, y que después extraiga un naipe, sin que nadie pueda ver su valor. Ahora basta ir volviendo una por una las 51 cartas restantes del mazo para poder dar correctamente el palo y el valor de la carta que fue extraída.

Para realizar semejante proeza, los ilusionistas han puesto a punto muchos algoritmos; de todos los que conozco, explicaré el que me ha parecido más sencillo. Conforme se van volviendo las cartas boca arriba, se va llevando mentalmente la suma acumulada de sus valores, despreciando 13 cada vez que se alcance o sobrepase este valor. Es decir, que si la suma acumulada es 13 o más de 13, se restan 13, y se conserva la diferencia. Podemos simplificar mucho la tarea gracias a estas dos reglas:

1. Se desprecian todos los reyes. Su valor, 13, es congruente con 0 (mód. 13), y, por tanto, no modifican la suma de la cuenta mental.

2. Para los dieces, sotas y reinas, en lugar de sumar 10, 11 o 12, es preferible restar 3, 2 y 1, respectivamente, porque en el sistema de aritmética de módulo 13, 10 es congruente con − 3, 11 es congruente con − 2, y 12 es congruente con − 1.

Una vez observada la última carta, se resta de 13 el número que hemos determinado mentalmente; la diferencia es el valor de la carta extraída. Si la diferencia fuese 0, la carta extraída habría sido un rey.

Pero, ¿cómo saber el palo? Un buen procedimiento es ir calculando disimuladamente con los pies, en aritmética de módulo 2. Se empieza con ambos pies apoyados de plano en el suelo. Con cada pica que salga se alza, o se baja, el tacón del pie izquierdo. Cuando salga un trébol se alza, o se baja, el talón del pie derecho. Si sale un corazón, se alteran simultáneamente las posiciones de ambos pies. De salir un diamante, no se hace nada. Al terminar de repasar la baraja, la posición de los pies indica el palo, según las siguientes reglas:

Si tan sólo está levantado el tacón izquierdo, la carta era una pica.

Si tan sólo está levantado el tacón derecho, la carta es de tréboles.

Si están alzados ambos talones, se trata de un corazón.

Si ambos tacones descansan en el suelo, la carta será de diamantes.

Practicando un poco resulta sorprendente la velocidad con que podemos repasar el mazo y adivinar la carta ausente.

Un ilusionista excepcionalmente fecundo en la invención de trucos de fundamento matemático es Robert Hummer. Muchas de sus creaciones están basadas en congruencias módulo 2, es decir, en el principio de paridades iguales o distintas. Presento aquí por primera vez un juego de misteriosos naipes cartománticos, una de las más ingeniosas concocciones salidas de las marmitas de Hummer.

Ante todo es necesario construir el juego de los siete naipes que vemos en la ilustración de dos páginas atrás. Vale la pena fotocopiarlos, pegarlos en cartulinas y recortarlos. He aquí cómo nos serviremos de ellos.

Tan sólo está permitido hacerle cada día una pregunta a la Bruja Burlona. Como es evidente, si se desea puede experimentarse con más de una pregunta, pero no es seguro que las respuestas sean de fiar. Las respuestas únicamente son válidas para el período de siete días siguientes al día en que se haga la pregunta. Se selecciona la carta que contiene la pregunta deseada y se coloca aparte. Tras barajar las seis restantes, se las sostiene boca abajo en una mano, mientras con la otra se dan unos cuantos pases mágicos, musitando cada vez el manta místico y precognitivo "Puthoffa Targu".

De lo alto del mazo separamos las dos primeras cartas. Si los sombreros de la Bruja son en ambas de igual color, se colocan las cartas aparte, una sobre otra. En caso contrario, las cartas se desechan. Tomamos ahora un segundo par. Si los sombreros tienen el mismo color apilamos estas cartas sobre las otras dos, o, si aquéllas fueron desechadas, comenzaremos una pila con las nuevas. Si los sombreros de éstas resultan de distinto color, las desechamos. Fijémonos en el par restante, y repitamos el procedimiento. Se cuenta ahora el número de pares que van a juego.

Este número puede ser 0, 1 o 2. Lo anotamos, pues formará el primer dígito de un número de tres cifras.

Volvemos a juntar las cartas, barajamos, pronunciamos el conjuro y repetimos todo el procedimiento, fijándonos ahora en el color de ojos. Anotaremos como segunda cifra del número cabalístico el número de pares concordantes.

Barajamos las seis cartas por tercera y última vez, y repasamos por pares el mazo, como antes, pero esta vez nos fijaremos en la concordancia de expresiones (Bruja sonriente o ceñuda). Se cuentan los pares de coincidencias –recuerde, estamos contando el número de parejas, no el número de cartas– y obtenemos así la última cifra del número mágico.

Buscamos el número construido en la ilustración de dos páginas atrás, y leemos la respuesta. A pesar de que las cifras del número se obtuvieron por un procedimiento aleatorio, las respuestas son específicas y tienen sentido únicamente para la pregunta formulada.

La Bruja sabe también responder "sí" o "no" a preguntas que puedan contestarse así, aunque no figuren entre las de los naipes. Para ello hemos de usar todas las cartas. Se sigue el mismo procedimiento de antes, observando primero los sombreros, luego los ojos y, finalmente, las expresiones del rostro. Pero ahora hay que formar dos pilas, una de pares concordantes y otra con los discordantes. Sobra una carta, que se desprecia. Se le resta el número de pares de la pila más pequeña al número de pares de la mayor, y se anota el resultado. Tras repetir tres veces el proceso, se tiene un número de tres cifras que –consultada la tabla– dará respuesta a la pregunta.

Es posible preparar conjuntos mayores de cartas y responder con ellas más preguntas. El número de naipes tiene que ser potencia de 2, disminuida en una unidad. Karl Fulves publicó en 1980 los *Bob Hummer's Collected Secrets,* donde se recopilan todos los trucos conocidos debidos a Hummer. El libro, auténtico filón de ideas de matemagia, puede pedirse a Fulves, enviando 20 dólares a Box 433, Teaneck, New Jersey 07666. En la página 77 del libro se describe un conjunto de 15 naipes cartománticos, cada uno provisto de cuatro caracteres que pueden concordar o no con los de los demás, que se utilizan en conjunción con un libro mágico (¡que no forma parte del envío!) donde se dan $8^4 = 4096$ respuestas *ad hoc.* Dejo al cuidado del lector descubrir por qué las respuestas siempre vienen a cuento.

Puesto que empecé la sección con unos ripios sobre congruencias, terminaré –por aplicación del principio de simetría– con otra estrofa humorística:

Una dama virtuosa, a los ochenta,
requería a un jovenzuelo... de sesenta.
Insistía ella, enfáticamente:
"Hay que analizarlo matemáticamente:
Por módulo cincuenta,
¡Yo tengo treinta!"

En la sección del mes de febrero dejé pendientes dos cuestiones relativas a pautas de números primos. La primera se refería a un proceso que al parecer generaba exclusivamente números primos. ¿Se dieron cuenta de que se trataba de la famosa fórmula de Euler para engendrar números primos, $41 + x + x^2$, hábilmente disfrazada? Dándole a x valores enteros, empezando por 0, la fórmula genera 40 números primos; para $n = 40$ el valor del polinomio no será ya un número primo, pues da $1681 = 41^2$.

La configuración triangular de Leo Moser se funda en las propiedades de una sucesión conocida por serie de fracciones de Farey. El proceso de Moser produce una sucesión que consta de número primo de términos en las nueve primeras filas, pero que falla en la fila $n = 10$, que da una sucesión formada por 33 números. Si en lugar de contar los números contásemos las cifras, la décima sucesión tendría 37 guarismos, número primo, pero la siguiente tiene $57 = 3 \times 19$ cifras.

Para obtener los k números de la n-ésima fila, se le suma 1 a la suma de los tocientes eulerianos correspondientes a los números de 1 a n. El tociente euleriano de un número natural n es el número de enteros positivos menores o iguales que n y que son primos con respecto a n, es decir, que no tienen con n divisores comunes, aparte del 1. Los tocientes eulerianos de los números de 1 a 10 son 1, 1, 2, 2, 4, 2, 6, 4, 6 y 4. La suma de estos números es 32. Sumando 1 resulta que la décima fila debe contener 33 números, y el número 33 es compuesto. Desconozco si Moser ha llegado a publicar o no esta curiosidad.

El par de números primos que se daban entonces por máximos de los conocidos ha sido desbancado por otro par todavía mayor, descubierto en 1980 por A. O. L. Atkin y Neil W. Rickert, matemáticos ambos de la Universidad de Illinois, y lòs mismos que detentaban el récord anterior. El nuevo par de primos gemelos, que constan de más de 1000 dígitos, es $1024803780 \times 2^{3424} \pm 1$.

Taller y laboratorio

Sam Epstein al habla: de cómo detectar metales en el aire, líquidos o sólidos por métodos de aficionado

Jearl Walker

Siguiendo los mismos procedimientos usuales en varios controles de contaminación, no es difícil para los aficionados detectar, en múltiples muestras, trazas metálicas del orden de la millonésima de gramo. Sam Epstein, químico de la planta de tratamiento Hyperion de Los Angeles, me ha descrito un procedimiento que él llama ensayo de manchas. Este procedimiento, que no precisa de instalaciones complicadas, puede utilizarse para detectar la presencia de prácticamente cualquier metal en muestras de aleaciones, minerales, agua y aire.

A modo de ejemplos, Epstein me ha descrito cómo detectar cobre, hierro y níquel. El primer paso es preparar soluciones testigo de cada uno de los metales. (Por regla general, el experimentador no disfrutará de la ventaja de saber lo que hay en la muestra a ensayar.) La solución de cobre se prepara disolviendo sulfato de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) en unos 10 mililitros de agua destilada que contenga una gota de ácido clorhídrico concentrado. Este es necesario para evitar que el metal forme hidróxidos insolubles que bloqueen su participación en las reacciones químicas durante la marcha del ensayo. Las soluciones testigo del hierro y del níquel se preparan con sulfato de níquel ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$) y cloruro férrico ($FeCl_3$).

Una solución probeta puede prepararse también disolviendo 0,1 gramos, o menos, del metal en 10 mililitros de una mezcla templada obtenida añadiendo 2,5 mililitros de ácido clorhídrico a 7,5 mililitros de agua destilada. (Se procederá siempre añadiendo lentamente el ácido sobre el agua; nunca el agua sobre el ácido. Cuando se trabaje con ácidos y bases, se llevarán siempre gafas protectoras y se trabajará en una zona bien ventilada o bajo una campana de laboratorio. En este artículo, siempre que mencionemos agua, se entenderá que es agua destilada.) A las soluciones de hierro y cobre deben añadirse unas cuantas gotas de peróxido de hidrógeno al 3 por ciento (calidad antiséptica). En la solución de cobre, el peróxido reacciona con el ácido clorhídrico formando cloro gaseoso, necesario para disolver el cobre en el ácido. En la otra solución pasa el hierro al estado férrico que se necesita para el ensayo.

Para preparar una solución de níquel se sumerge dentro del ácido un objeto recubierto de níquel durante el tiempo suficiente para eliminar la capa delgada de níquel. Puede valer un tornillo recubierto de níquel. Quizá haya que verter también una o dos gotas de peróxido. Como paso final, se hierve poco a poco cada solución para eliminar los restos de peróxido y de cloro.

Para que sirvan como indicadores de los metales hay que preparar otro grupo de soluciones. El reactivo indicador del níquel es dimetilglioxima (DMG), del que se prepara una solución añadiendo un gramo de DMG sólida a unos 100 mililitros de alcohol de friegas templado. Este reactivo se agita bien, hasta asegurarse de que la solución está saturada. El indicador para el cobre y para el ion férrico es, en ambos casos, ferrocianuro potásico ($K_4Fe(CN)_6$) al 1 por ciento; éste se obtiene disolviendo un gramo del sólido en 100 mililitros de agua.

Así demuestra Epstein la detección del níquel: pone una gota de la solución de níquel en un trozo de papel de filtro; luego, mantiene este trozo de papel sobre la boca de una botella abierta de hidróxido amónico concentrado, operación corrientemente conocida como exposición a vapores; a continuación, vierte una gota de la solución de DMG en el mismo lugar del papel. Segundos más tarde aparece una mancha escarlata brillante, que delata la presencia de níquel.

Para revelar la presencia de cobre o hierro, se sigue un procedimiento similar. Se prepara el papel añadiéndole una gota de la solución de cobre o de hierro. Luego se añade una gota de ferrocianuro, con lo que la mancha se vuelve verde azulada si hay iones férricos presentes y, marrón rojiza, si hay cobre.

El ensayo puede efectuarse sobre una "placa de manchas" en lugar de papel. Esta placa es una bandeja plana de porcelana pulida, dotada de pequeñas depresiones circulares, en una de las cuales se coloca una gota de la solución testigo, seguida de una gota del reactivo indicador. Los compuestos coloreados que delatan la presencia de los metales aparecen casi en seguida.

Si es níquel lo que se busca, deberá añadirse además una gota de hidróxido amónico al 50 por ciento y agitar la mezcla con una varilla de vidrio o plástico. Se añade luego una gota testigo de DMG y vuelve a agitarse la mezcla. Si la solución a prueba contiene níquel, se precipitará níquel DMG, que es rojo, revelando que la solución contiene níquel entre sus componentes.

Para poner de manifiesto la sensibilidad de su procedimiento, Epstein diluye las soluciones testigo repetidamente, añadiendo cada vez cinco mililitros de agua a cinco mililitros de la solución testigo; agrega otra gota de ácido clorhídrico cada tres diluciones. Según afirma, los colores chivatos siguen siendo detectables después incluso de gran número de diluciones.

Una muestra recogida del medio ambiente puede contener varios metales. Quizá no baste con una sola prueba, si el reactivo indicador revela más de un metal. Por ejemplo, el ferrocianuro delata tanto al cobre como al hierro y, si en la muestra están ambos presentes, en el ensayo aparecerán dos compuestos coloreados, confundiéndose los resultados.

Al objeto de obviar ese tipo de interferencia se han desarrollado varias técnicas. Para la mayoría de los metales se dispone de varios reactivos colorantes. A través de la experimentación podremos aislar un reactivo que reaccione con uno solo de los metales presentes en la solución. Por ejemplo, el cobre

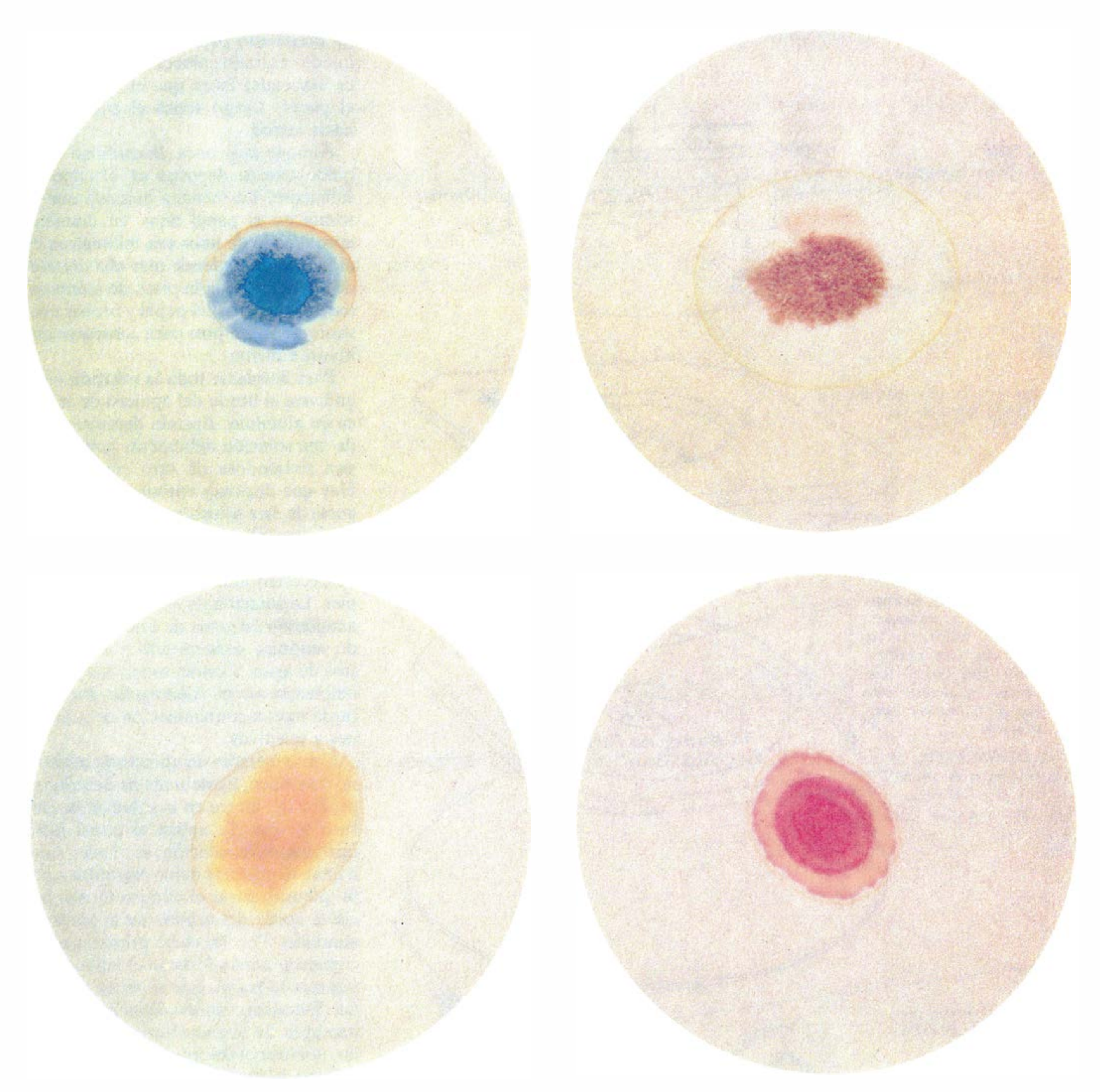
puede detectarse en presencia del ion férrico si se emplea para el cobre un reactivo indicador que no sea ferrocianuro.

Otra vía (llamada de enmascaramiento) de eliminar la interferencia consiste en añadir a la solución testigo un compuesto químico que se combine con uno de los metales, impidiendo que éste reaccione con el reactivo indicador, y dejando al otro sólo para la reacción. Con una muestra del medio ambiente desconocida habrá que repetir los intentos hasta dar con el reactivo adecuado.

A veces, podremos alterar el *p*H de la gota a ensayar para facilitar la detección de dos metales en la misma muestra. Así, el níquel y el paladio reaccionan los dos con la DMG. El níquel produce una sustancia escarlata, pero únicamente en solución básica, y el paladio una sustancia amarilla, pero sólo en solución ácida. Cuando se sospeche de la presencia de ambos metales en la muestra, se introduce hidróxido amónico a fin de asegurarse que no es ácida. Entonces, al añadir DMG, una sustancia escarlata indicará la presencia de níquel. Al añadir luego ácido clorhídrico a la gota, desaparecerá el color escarlata y el paladio se combinará con la DMG para dar una sustancia amarilla.

Hay un procedimiento diferente para eliminar la interferencia de colores que hace uso de un sencillo dispositivo llamado horno de anillos. El procedimiento en cuestión permite detectar varios metales a la vez y aumenta, además, la sensibilidd del ensayo. Sobre un hornillo eléctrico se coloca una placa metálica plana con un agujero en el centro.

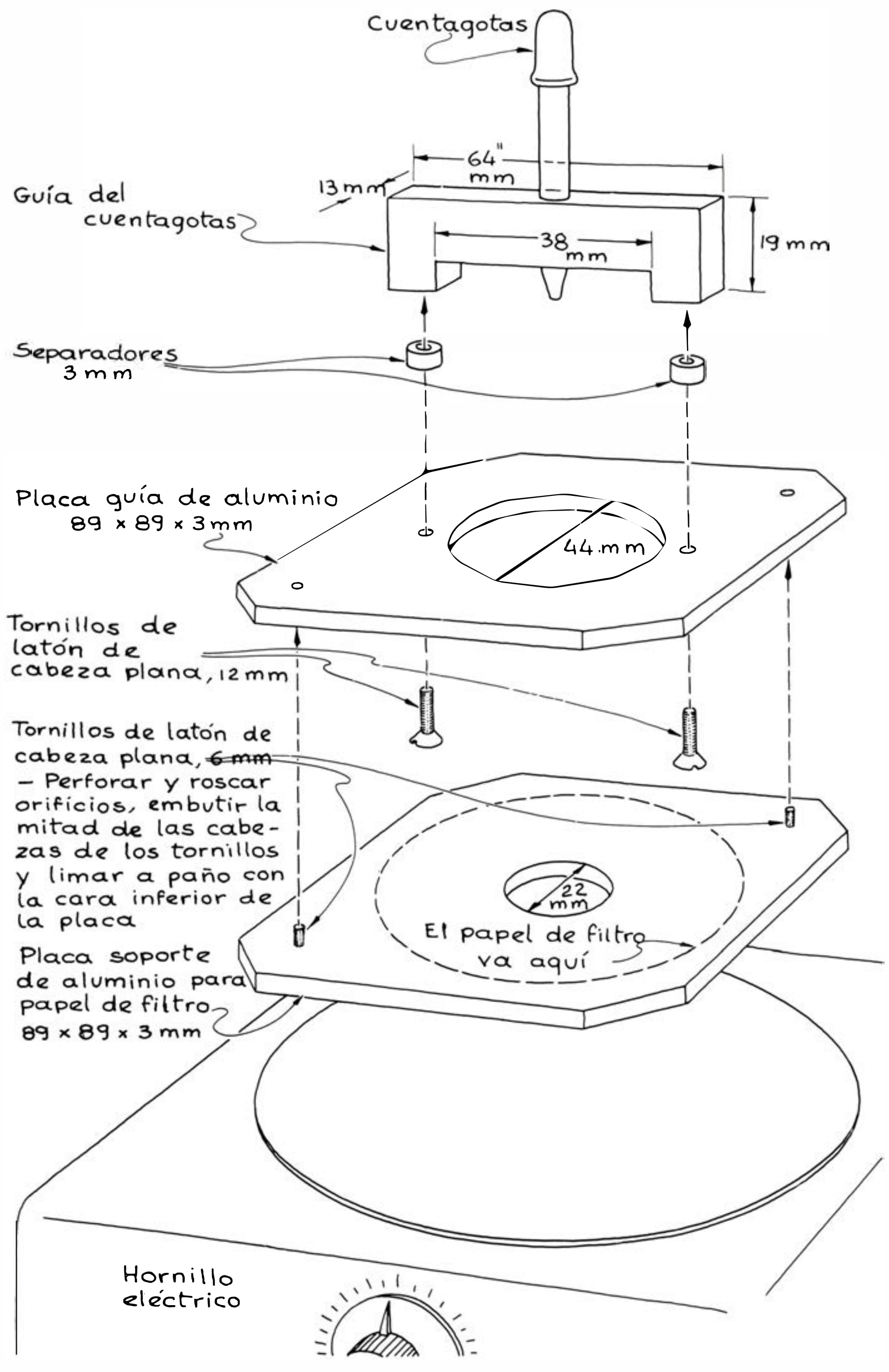
Encima del agujero se pone un papel filtro en el que se han depositado algu-



Ensayo de manchas de Sam Epstein. En sentido horario, empezando por arriba, a la izquierda: hierro, cobre, níquel y paladio

nas gotas de la solución. El líquido se extiende luego por el papel hacia el borde del agujero, donde el disolvente y las demás sustancias volátiles se evaporan dejando un delgado anillo formado por los sólidos de la disolución. Luego, se añade gota a gota un disolvente de arrastre que lleve toda la solución testigo hacia el anillo. Este sistema de detección es más sensible que los otros que les he descrito, porque todas las sustancias disueltas se concentran en el anillo. Finalmente, cuando se ha secado el papel filtro, éste se corta en sectores donde pueden detectarse por separado los distintos metales por la técnica del papel filtro.

El horno de anillos de Epstein se compone de tres partes: un hornillo eléctrico, una placa de aluminio con un orificio y una guía mediante la cual se centra un cuentagotas que debe depositar gotas de solución o de reactivo. Se coloca la placa de aluminio sobre el hornillo y, sobre el agujero, un papel filtro. La placa de aluminio posee dos tornillos de latón que le sirven a Epstein para ajustar la guía del cuentagotas en posición encima del papel. El líquido se deposita sobre el papel a través de un cuentagotas sanitario inserto en la guía y, como ésta se halla inmóvil, las gotas van cayendo una tras otra en el mismo punto del papel.



Horno de anillos ideado por Epstein para su ensayo de manchas

El papel filtro mide de unos cinco y medio a siete centímetros de diámetro. Es moderadamente retentivo; puede servir el filtro Whatman del n.º 40. El hornillo debe estar a unos cuantos grados por encima de la temperatura de ebullición del agua. Para recoger una muestra del líquido, Epstein sumerge la punta del cuentagotas en el mismo, dando tiempo a que, por capilaridad, penetre un poco por la abertura de la punta del cuentagotas. Seguidamente coloca éste en el orificio de la guía, que ya ha preparado para que se ciña bien y quede centrado correctamente, y lo hace descender hasta que el líquido toca el papel. Luego retira el cuentagotas hacia arriba.

Aunque muy poca, la cantidad de líquido que se deposita en el papel es suficiente. La mancha húmeda que se forma en el papel tiene un diámetro aproximado de unos seis milímetros. Si el líquido se extiende más allá del borde del agujero de la placa de aluminio, hay que desechar el papel y probar nuevamente sobre otro para conseguir una mancha menor.

Para desplazar toda la solución testigo hacia el borde del agujero de la placa de aluminio, Epstein deposita gotas de una solución débilmente ácida o básica sirviéndose de otro cuentagotas. Hay que disponer entonces de unas 10 gotas de esta solución de arrastre. Aquí tampoco el líquido debe rebasar el borde del agujero, pues de lo contrario aparecerían anillos desiguales o múltiples. La solución de arrastre se prepara añadiendo 10 gotas de ácido o hidróxido amónico concentrado a 100 mililitros de agua. Epstein señala que deben emplearse varios cuentagotas para evitar la mutua contaminación de soluciones y reactivos.

Como ejemplo de utilización del horno de anillos, Epstein me ha descrito su prueba del hierro en la solución de cloruro férrico. Se aplica al papel filtro una gota de la solución; se añaden, una a una, 10 gotas de ácido clorhídrico débil para arrastrar el cloruro férrico hacia el borde del orificio de la placa de aluminio. Tras las cinco primeras gotas comienza a manifestarse el anillo. Una vez seco el papel, éste se retira del horno. Entonces, cuando Epstein deposita una gota de ferrocianuro sobre el anillo, aparece el color verde azulado, que anuncia la presencia de iones férricos.

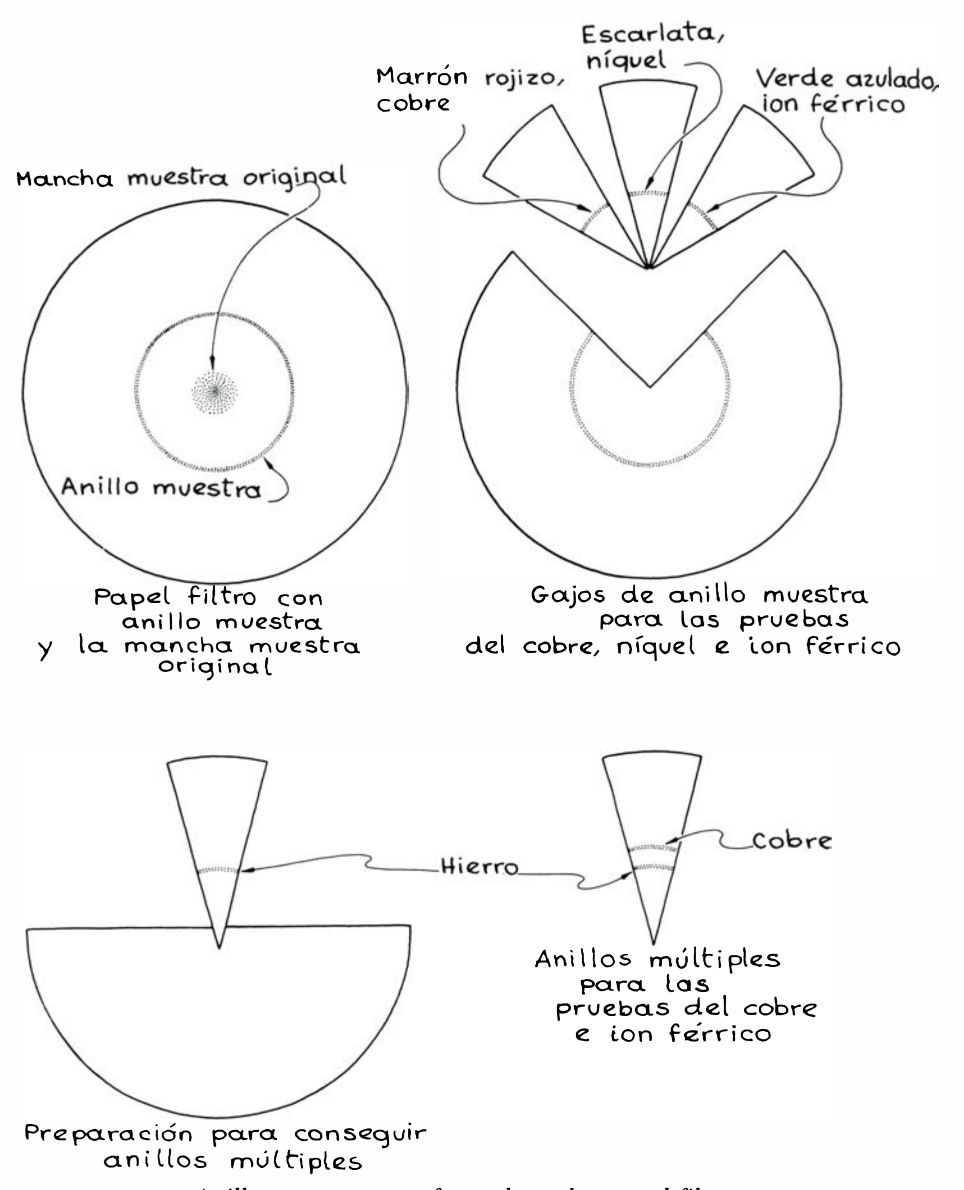
Epstein me ha explicado también có-

mo aborda una solución para detectar dos metales. Mezcla parte de la solución de níquel con la de cobre y pone una gota de la combinación en un trozo de papel filtro y éste sobre el horno. Para facilitar el desplazamiento de materia hacia el exterior y la formación del anillo, agrega una gota de ácido clorhídrico. Una vez seco el papel, lo corta en dos mitades. En una de ellas pone ferrocianuro para obtener el color marrón rojizo revelador del cobre. Expone la otra mitad a los vapores de hidróxido amónico y vierte una gota de solución de DMG; así aparece el color escarlata característico del níquel.

Con el horno de anillos se vencen también las interferencias cuando algún indicador reacciona con más de uno de los metales. Epstein lo ilustra mezclando soluciones de cobre e ion férrico. Vierte una gota de la solución a ensayar sobre papel filtro, arrastrándola hacia fuera para que forme un anillo mediante una solución débilmente ácida. Pero esta vez, del papel seco se corta un trozo en forma de gajo, que se une a la mitad de un papel filtro nuevo. Con un hilo finísimo de pegamento duco sujeta la punta del gajo al filtro nuevo, al objeto de establecer un contacto suficiente para que se efectúe la transferencia de líquido entre ambos papeles.

Los filtros así combinados se introducen en el horno de anillos, procurando que la superficie de contacto quede centrada con el agujero de la placa soporte de aluminio. Luego, se aplica gota a gota hidróxido amónico, el cual arrastra el cobre para formar un nuevo anillo, mientras que el anillo del hierro permanece en el gajo porque esta compuesto de hidróxido férrico insoluble. Una vez seco el gajo, se retira del horno y se expone a los vapores de ácido clorhídrico concentrado. Finalmente se deposita una gota de solución de ferrocianuro en cada uno de los segmentos circulares. Con ello, el anillo exterior se vuelve marrón rojizo, lo que delata la presencia del cobre, y el anillo interior se vuelve verde azulado, lo que delata al ion férrico.

Para contrarrestar la interferencia puede optarse por otro método que consiste en hacer que uno de los metales precipite en el mismo lugar donde se deposita la gota a analizar. Así podrá arrastrarse hacia el exterior el otro metal para que forme un anillo y sea detectado. Esta técnica funciona bien con una mezcla de cobre, níquel e iones férricos. Sobre el papel filtro se vierte una gota de la mezcla y se añade hidróxido amónico para arrastrar la materia al exterior y que forme anillo. Pero ocurre que el hidróxido reacciona con el hierro para dar hidróxido férrico, que permanece en el lugar donde se depositó la gota. El níquel y el cobre son arrastrados para formar anillos, ya que son solubles en el hidróxido amónico. A una parte del anillo se le hace la prueba de la DMG (con exposición a vapores de amoniaco si es necesario) para detectar el níquel. Se expone la otra parte del anillo a los vapores de ácido clorhídrico; se le añade luego ferrocianuro para detectar el cobre. Por último, la presencia del hierro en el centro del papel se detecta exponiéndolo a los vapores del ácido y añadiendo ferrocianuro. Si en el centro del papel precipitan varios metales, puede continuarse el ensayo recortando el centro y colocándolo sobre un papel filtro nuevo; entonces, se añaden gota a gota los disolventes adecuados para que arrastren materia y se forme otro anillo sobre el nuevo filtro.



Anillos con muestras formados sobre papel filtro

Epstein me ha remitido una forma de analizar el material metálico de monedas como las de diez o veinticinco centavos, que se hacen de una aleación de níquel y cobre. Se lima una pequeñísima cantidad de metal del canto de la moneda y se disuelven las limaduras en una mezcla de ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno. Se recoge una gota de la solución y se desposita en un papel filtro que se coloca en el horno de anillos. Para detectar el cobre y el níquel en esta gota se siguen los procedimientos correspondientes antes descritos.

Si la moneda es demasiado valiosa para que se estropee, puede seguirse otro método que, en esencia, viene a ser una galvanoplastia al revés. Consis-

te en que la moneda actúe como ánodo en el circuito representado en la ilustración de esta misma página. El papel filtro, con una mancha de una solución al 10 por ciento de algún electrolito como nitrato sólido, se coloca sobre la placa de aluminio. Contra la mancha de electrolito se coloca una parte de la moneda que esté libre de suciedad y grasa; Epstein sugiere un borde. El cable del terminal positivo de la batería se pone entonces en contacto con la moneda, dejando que pase la corriente durante unos 10 segundos.

Se precisa cierta habilidad para controlar el tiempo, la corriente y la presión sobre la moneda. Si el experimento sale bien, en una depresión del papel quedará una pequeña cantidad de metal disuelto. Este papel se pone en el horno de anillos, se aplican las soluciones de arrastre adecuadas y se examinan los anillos con los reactivos correctos. Por su parte, la moneda no habrá quedado visiblemente alterada.

Para investigar una moneda de plata, que puede conseguirse de un tratante de monedas, se lima una pizca de metal del canto, se añaden las limaduras a unos cuantos mililitros de ácido nítrico al 10 por ciento y se hierve éste poco a poco para eliminar los óxidos de nitrógeno. Cuando la solución se haya enfriado hasta la temperatura ambiente, se pone una gota de ella sobre un papel filtro y se añade una gota de cromato potásico al 1 por ciento. Para delatar la presencia de la plata, la mancha se volverá de un color marrón rojizo.

También podría utilizarse el circuito eléctrico para depositar una pequeña cantidad de aleación de plata directamente sobre el papel filtro. Algunas monedas de plata antiguas se componen de un 90 por ciento de plata y un 10 por ciento de cobre; pueden detectarse los dos si la mancha donde está depositada la muestra se pasa por el horno para que forme un anillo. Como solución de arrastre se usa ácido nítrico al 1 por ciento. Para señalar la presencia de plata se añade cromato potásico a una parte del anillo. Sin embargo, el ferrocianuro no consigue delatar al cobre. Para aumentar la sensibilidad del ensayo, Epstein sugiere emplear una solución saturada de ácido rubeánico (ditiooxamida) en alcohol y una solución de ácido malónico al 20 por ciento. Se le añade el ácido malónico a una parte del anillo y después el ácido rubeánico; si hay cobre presente, se ennegrecerá esa parte del anillo.

Pueden ensayarse muestras de agua para detectar metales, incluidos hierro, cobre y cinc. Epstein advierte que si los primeros intentos con el horno de anillos se muestran negativos, la mezcla debe hacerse más concentrada hirviéndola en un matraz de pirex. Se agregan unas gotas de ácido clorhídrico y se repiten otra vez los ensayos, empleando ferrocianuro para la prueba del hierro y ácidos malónico y rubeánico para la del cobre.

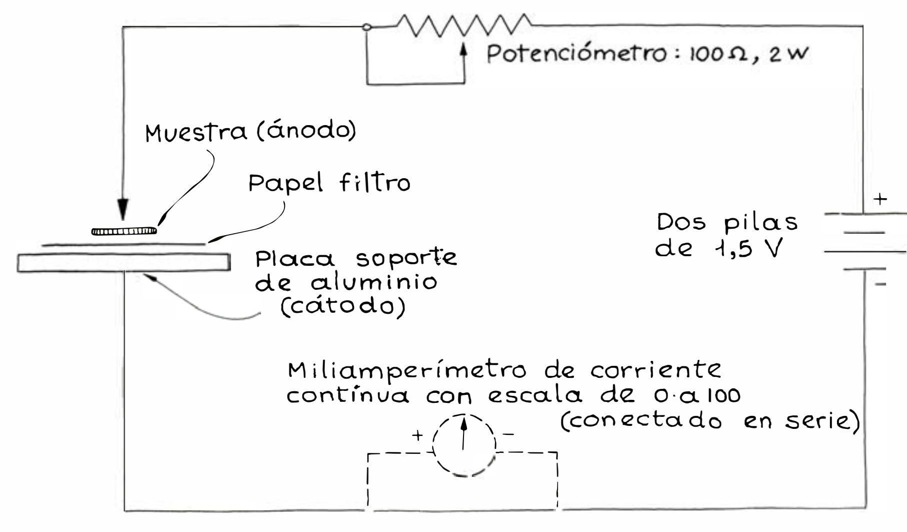
En la prueba del cinc se necesitan dos soluciones. En una de ellas, se prepara tiocianato mercúrico disolviendo nueve gramos de tiocianato amónico (NH_4SCN) y ocho gramos de cloruro mercúrico ($HgCl_2$) en 100 mililitros de agua. (Es fundamental una buena ventilación.) Seguidamente, la solución debe mantenerse durante dos o tres días. La otra mezcla que se necesita es una mezcla de una solución de una sal de cobalto al 0,02 por ciento en ácido clorhídrico al 4 por ciento. Epstein afirma que el cloruro de cobalto ($CoCl_2$), el sulfato de cobalto ($CoSO_4$) y el nitrato de cobalto [$CO(NO_3)_2$] resultan satisfactorios.

La muestra de agua se aplica a un papel filtro y se pasa por el horno de anillos, como de costumbre. Cuando se haya formado el anillo, se le hace la prueba del cinc a un gajo; es decir, se mancha con una gota de la solución de cobalto y se le sumerge varias veces en un poco de tiocianato mercúrico. Si hay cinc presente, el anillo adquirirá muy pronto un color azul. De lo contrario, la precipitación se retrasará dos o tres minutos.

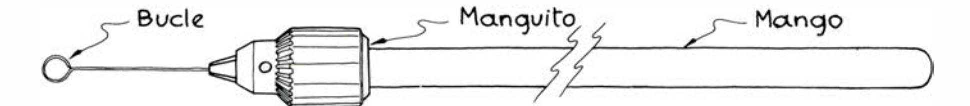
Para ejercitarse con esta prueba puede usarse ácido clorhídrico en el que se disuelve una pequeña cantidad de cinc procedente de un trozo de hierro galvanizado o de la envuelta de una pila de linterna. También puede conseguirse cinc a partir de determinadas aleaciones de aluminio disolviendo una pequeña cantidad en ácido clorhídrico. Si este tratamiento da por resultado un residuo gris e insoluble, que es silicio, deberá filtrarse la muestra antes del ensayo. Como fuente de cinc pueden emplearse también las aleaciones de cobre. A tal fin, se disuelve un poco de metal en ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno y luego se hierve. Para eliminar el cobre, que interferiría en el ensayo, se añaden limaduras de hierro y, cuando desaparezca el color azul del cobre, se filtra la solución y se le somete a la prueba del cinc.

Epstein señala que el bronce de aluminio, que es una aleación de cobre sumamente dura que no contiene cinc, puede identificarse por una prueba del cinc negativa seguida de una prueba del aluminio positiva. En un hoyo de una placa de manchas se mezcla una gota de la solución a ensayar con una gota de una solución de acetato amónico al 1 por ciento; se añade luego una gota de solución de aluminón al 0,1 por ciento. (El aluminón es la sal amónica del ácido aurintricarboxílico.) La mezcla se vuelve roja en presencia de aluminio. La prueba puede efectuarse también sobre papel filtro. Para ejercitarse con este ensayo puede emplearse papel de aluminio disuelto en ácido clorhídrico al 10 por ciento.

El compuesto de aluminio responsable del efecto tampón de la aspirina tamponada puede detectarse con papel filtro o una placa de manchas. Para ello se disuelve una tableta de aspirina en ácido clorhídrico templado y diluido.



Circuito de galvanoplastia invertido para comprobar el contenido de una moneda



Bucle de alambre para fundir muestras de minerales

Quizá haya que filtrar la solución para eliminar los sedimentos. Seguidamente se procede a la prueba del aluminio.

El cinc es uno de los componentes principales del bronce manganoso, aleación de cobre apreciada por su gran resistencia a la tracción en piezas como hélices de barco. En esta aleación se encuentran también cantidades menores de manganeso y aluminio; puede distinguirse del bronce de aluminio y del latón amarillo ordinario (aleación de cobre y cinc) haciendo las correspondientes pruebas del cinc, manganeso y aluminio. Para la prueba del manganeso se deposita una gota de la muestra sobre papel filtro, seguida de una gota de hidróxido amónico concentrado y luego una gota de nitrato de plata al 10 por ciento. El manganeso se revela por el color negro que aparece entonces.

Muchos de los procedimientos que les he descrito pueden invertirse, para poner de manifiesto que la presencia de lo que habitualmente sirve como indicador de un metal. Por ejemplo, a una muestra testigo puede añadirse una solución de níquel al objeto de delatar la presencia de DMG. Análogamente, el manganeso sirve para hacer una prueba de la plata. En este caso, se expone a los vapores de ácido clorhídrico un papel filtro con una gota de muestra y luego se trata con sendas gotas de solución de nitrato de manganeso al 1 por ciento e hidróxido sódico al 0,5 por ciento. (Como fuente de hidróxido sódico puede servir lejía casera.) Si hay plata presente aparecerá una mancha negra. Epstein afirma que esta prueba de la plata es más concluyente que la que se hace con cromato potásico. Existen otros metales, además de la plata, que pueden formar compuestos coloreados con los cromatos; uno de ellos es el cromato de plomo, una sustancia amarilla insoluble.

Una fuente de agua muy interesante con la que puede trabajarse es la descarga de plantas industriales. Así, las plantas metalúrgicas, los talleres de galvanoplastia, las forjas y las operaciones de minería y de fundición producen unas aguas residuales con concentraciones relativamente elevadas de metales tóxicos como cobre, cinc, plomo y cromo. Para efectuar la prueba del cromo se forma un anillo en el horno y se emplea ácido clorhídrico como agente de arrastre. Sobre un segmento del anillo, se coloca entonces una gota de hidróxido amónico concentrado y una gota de peróxido de hidrógeno y se seca el papel en el hornillo. A continuación, se añade una gota de solución recién preparada de difenilcarbazida al 1 por ciento y una gota de ácido sulfúrico al 5 por ciento. En presencia de cromo, el segmento se pondrá violeta. Epstein advierte que debe ensayarse como contraste una muestra de agua destilada, ya que el procedimiento puede originar un coloreado débil, incluso en ausencia de cromo.

Cuando sobre la muestra de agua se efectúe la prueba del plomo, se formará el anillo con ácido nítrico y no con ácido clorhídrico, pues éste origina cloruro de plomo que precipita en el centro del papel. Se vierte sobre el anillo una gota de rodiozonato sódico al 0,2 por ciento, recién preparado. Si hay plomo presente, el segmento se pondrá azul. Para ejercitarse con esta prueba puede emplearse una solución de nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$) o plomo metálico disuelto en ácido nítrico al 10 por ciento.

Epstein me ha descrito también cómo analizar minerales para detectar metales. Las muestras minerales no suelen disolverse con facilidad en ácido; para solubilizarlas debe recurrirse al perlado, que es un procedimiento corriente en mineralogía. Este se lleva a cabo calentando a la llama un bucle hecho con alambre de platino que luego se sumerge en carbonato sódico. (Puede emplearse sosa caústica común.) El bucle se calienta repetidamente hasta que el material fusible que se adhiere al alambre forme una perla. Quizá haya que repetir el procedimiento hasta que se forme una perla sólida.

Con la perla aún caliente, se sumerge en la muestra testigo pulverizada y luego vuelve a calentarse hasta conformar una perla coloreada homogénea. Esta técnica suele requerir una llama bastante caliente, que puede generarse con un mechero Meker y aire comprimido o un soplete de mineralogía. Epstein afirma también que en ciertas ocasiones el bórax puede actuar mejor que el carbonato sódico.

Sustancia	Peso (gramos)
Aluminón	5
Acetato amónico	100
Tiocianato amónico	100
Cloruro de bario	100
Cloruro de cobalto	50
Sulfato de cobre	100
Dimetilglioxima	25
Difenilcarbazida	5
Ditiooxamida	10
Cloruro férrico	200
Nitrato de plomo	100
Acido malónico	25
Nitrato de manganeso	50
Cloruro mercúrico	10
Sulfato de níquel	25
Acido oxálico	100
Cromato potásico	50
Ferrocianuro potásico	50
Nitrato de plata	5
Carbonato sódico	100
Hidróxido sódico	100
Nitrato sódico	50
Rodizonato sódico	1

Compuestos químicos que intervienen en los ensayos

Una vez formada la perla, se separa del alambre, se pulveriza y se vierte en un tubo de ensayo. Se agregan al preparado algunos mililitros de ácido nítrico al 50 por ciento, y luego se calienta cuidadosamente hasta que su contenido se seca. (No recalentar el tubo.) Enfriado el tubo, se añaden tres mililitros de agua y vuelve a hervirse la mezcla brevemente. Por último, se filtra para eliminar la sílice. Con esto, la solución queda preparada para utilizarse en cualquiera de las técnicas del ensayo de manchas.

El montaje eléctrico instalado para el estudio de monedas puede servir para otras muestras mayores, como fragmentos metálicos o trozos de alambre. Y puede emplearse no sólo para detectar metales puros y estudiar aleaciones, sino también para examinar recubrimientos superficiales y revelar faltas de uniformidad como porosidades en depósitos electrolíticos.

A modo de ejemplo, Epstein me ha descrito cómo detecta el níquel en una moneda de cinco centavos. Usa de electrolito una solución de 50 gramos de carbonato sódico y cinco gramos de cloruro sódico en un litro. Con cuatro trozos de papel filtro se forma un tampón que se sumerge en la solución durante unos segundos y que luego se intercala y aprieta entre dos toallas de papel para eliminar el líquido sobrante. El tampón se coloca en la placa catódica de aluminio.

Cuando el circuito se cierra, se transfiere al papel una impresión de una de las caras de la moneda. Se retira del tampón el filtro superior, se expone a los vapores de hidróxido amónico y se añaden dos o tres gotas de DMG. Epstein afirma que así aparece una buena reproducción en escarlata brillante de Thomas Jefferson o de Monticello.

Por un procedimiento similar se alcanza una impresión gris oscura de una moneda. Para ello, se efectúa la transferencia electrolítica, se retira el filtro de arriba y se sostiene éste junto a una bombilla. La plata transferida durante el paso de la corriente se ha combinado con el cloruro de la solución para formar cloruro de plata, que es sensible a la luz. Entonces, a la luz de la bombilla, el filtro se comportará como una placa fotográfica expuesta a la luz.

Trabajando con la otra cara de la moneda podremos detectar el cobre de ésta. El papel filtro se expone a los vapores de hidróxido amónico para generar el azul intenso propio del ion cupro-amónico. (Tras cada ensayo debe lavarse y secarse la placa de aluminio.) Aunque estas pruebas de la plata y del cobre bastan para exámenes electrográficos, les falta sensibilidad para ensayos de micromanchas.

El material y los productos necesarios para hacer pruebas de manchas pueden obtenerse en numerosos establecimientos de artículos químicos. Los productos químicos pueden comprarse en droguerías y tiendas especializadas. Para las soluciones alcohólicas es adecuado el alcohol de quemar.

Cuando se manejan productos químicos potencialmente peligrosos se impone atenerse a unos procedimientos experimentales correctos. No hay que tocar las sustancias con las manos. Si nos alcanza una salpicadura o ésta afecta a la zona de trabajo, la salpicadura se lava con gran cantidad de agua fría hasta que desaparezca completamente. Al disolver ácidos concentrados, especialmente sulfúrico, se añade el ácido sobre el agua dejándolo bajar lentamente por la pared del recipiente a la vez que se agita la mezcla. Cuidado con el calor que se genera en este proceso.

Con las técnicas del ensayo de manchas pueden hacerse muchas cosas más. En otra ocasión les describiré el procedimiento de Epstein para detectar la contaminación del aire, incluida la lluvia ácida. Si alguien ensaya con muestras ambientales de agua o suelos, recibiré con gusto noticias de sus resultados.

Libros

Evolución del pensamiento de Galileo, complejidad de la inmunopatología y recuerdos del H.M.S. Beagle

Julio Samsó, Jordi Vives y Joandomènec Ros

ESTUDIOS GALILEANOS, por Alexandre Koyré, traducción de Mariano González Ambou. Siglo Veintiuno Editores. Madrid, 1980. Publicar, a estas alturas, una versión castellana de los *Études galiléennes* de Alexandre Koyré supone la recuperación, para los lectores españoles, de un gran clásico de la historia de la ciencia, pero no puede interpretarse, en modo alguno, como una novedad. Los *Études* se publicaron, por vez primera, en 1939, y la reedición de 1966 (a la que la versión castellana se refiere como "primera edición") no fue más que una simple reimpresión de la edición de 1939, la cual, a su vez, reeditaba dos trabajos aparecidos previamente bajo forma de artículos, entre 1935 y 1937, a los que se añadía un tercero inédito. Otras publicaciones del propio Koyré sobre el tema, que aparecieron en los años sucesivos (1943, 1945 y 1960 principalmente) no aparecen ni siquiera citados en la reimpresión de 1966. Valga lo anterior como simple advertencia al lector de que se encuentra ante un libro con más de cuarenta años de vida.

Alexandre Koyré (1892-1964) es uno de los grandes maestros de este siglo en el campo de la historia de la ciencia. Para valorar la importancia de su obra basta recordar que se trata de uno de los escasos historiadores de la ciencia que ha merecido el honor de ser objeto de un largo artículo en el "Dictionary of Scientific Biography" (vol. VII, New York, 1973, págs. 482-490) debido precisamente al editor de la obra, Charles C. Gillispie. El citado artículo, junto con la introducción –escrita por I. Bernard Cohen y René Taton– a las "Mélanges Alexandre Koyré" (vol. I, París, 1964), nos informan adecuadamente acerca de su personalidad. De origen ruso, se formó en Francia donde estudió filosofía y enseñó en la muy prestigiosa École des Hautes Études, amén de ser profesor visitante en El Cairo y, durante la Segunda Guerra Mundial y en los años de la postguerra, en varias universidades norteamericanas. Como historiador de la ciencia, su labor investigadora se centró, sobre todo, en el tema de la revolución científica de la Edad Moderna: sus libros fundamentales son, además del que comento aquí, su *From the Closed World to the Infinite Universe* (Baltimore 1957, del que hay versión castellana también en Siglo XXI), *La révolution astronomique: Copernic, Kepler, Borelli* (París, 1961), *Newtonian Studies* (Cambridge, Mass., 1965) y *Études d'histoire de la pensée scientifique* (París, 1966; hay también versión castellana en Siglo XXI y, en ella, el lector curioso podrá encontrar algunos de los trabajos de Koyré sobre Galileo posteriores a 1940). No obstante, no debe olvidarse que nuestro autor era, ante todo, un historiador de la filosofía y este hecho tiene especial relevancia a la hora de leer su obra maestra, sus *Estudios galileanos,* en los que se transparenta fácilmente la idea básica de Koyré quien no creía en la total independencia de la evolución del pensamiento científico, sino que afirmaba que ésta se encuentra estrechamente ligada a la de las ideas transcientíficas (filosóficas, metafísicas y religiosas).

He mencionado ya que los *Estudios,* aunque tienen una indudable unidad, son el resultado de la recopilación de tres trabajos independientes. El primero se titula *En los albores de la ciencia clásica* (págs. 1-72) y en él, tras revisar los distintos intentos de caracterización de la revolución científica del siglo XVII, Koyré nos describe, a grandes rasgos, las dos etapas básicas de la evolución de la física anterior a Galileo: la primera es la *cosmofísica aristotélica,* que representa a través de algunos pasajes de los *Juvenilia* galileanos y del *De motu* de Francesco Bonamico, maestro de Galileo. En lo que respecta a la física de Aristóteles, Koyré insiste en la noción de lugar natural al que tiende a regresar todo cuerpo que se encuentra separado de él, en la explicación del movimiento de un proyectil por la acción del medio que le empuja, continuando de este modo la labor del motor y, como consecuencia de esto, en la negación de la posibilidad de que exista movimiento en el vacío. Frente a estas teorías del filósofo griego, la tradición medieval opuso la hipótesis del *impetus,* surgida, según parece, de la obra de Juan Filópono (s. VI), elaborada por los autores árabes medievales y –según Koyré– por los nominalistas parisienses del siglo XIV. Esta teoría intenta explicar el movimiento de un móvil, una vez éste se encuentra separado del motor, sin necesidad de recurrir a la acción del medio ya que concibe el *impetus* como una cualidad, potencia o virtud que impregna al móvil y lo hace moverse. Los partidarios del *impetus* admiten, asimismo, la existencia del vacío, ya que no resulta incompatible con su explicación del movimiento. Para Koyré éste sería el punto de partida de Galileo en su etapa de Pisa (1589-1591): en este período inicial habría desarrollado la dinámica del *impetus* y realizado los primeros intentos de matematizar la física según el modelo arquimediano. Tiene especial interés en esta etapa su intento de reducir a una fórmula la velocidad (V) uniforme (salvo en los momentos iniciales) de un grave en su caída en función de su peso específico (P) y del peso específico (M) del medio que le opone resistencia. Tendríamos entonces: $V = P - M$. Aristóteles, por otra parte, había defendido en la Antigüedad que $V = P/M$. Ahora bien, ya en 1951 Moody publicó un importante trabajo sobre la dinámica pisana de Galileo (matizado en 1965 por Grant) que nos permite aclarar algo más –con respecto a lo aportado por Koyré– la línea de pensamiento en la que se mueve el físico italiano: la fórmula sustractiva postulada por Galileo se encuentra expuesta de manera similar por Juan Filópono y recogida, en el siglo XII, por el filósofo hispanoárabe Avempace, así como también por diversos escolásticos latinos del siglo XIII. La mencionada ley de caída de los graves aparece en un contexto ideológico neoplatónico, abandonado en el s. XIV europeo (en el que se produce un retorno al aristotelismo) tanto por los nominalistas parisienses como por el grupo del Merton College. A través de Avempace la mencionada ley era bien conocida en los medios italianos del s. XVI. Lo anterior corresponde a la monografía de Moody sobre el tema, por más que Grant introduzca algunas correcciones a los planteamientos expuestos: si bien es cierto que Galileo se sitúa en la línea de la tradición de Filópolo-Avempace, parece claro que estos dos autores no pensaban en pesos específicos cuando formularon su ley de la caída de los graves y que esta novedad es propia de la física del siglo XVI. Resumiendo, pues, los trabajos publicados con posterioridad a la obra de Koyré confirman su hipótesis

según la cual Galileo se encontraría en el seno de una tradición [neo]platónica que remonta, por lo menos, al siglo VI de nuestra era. Por otra parte no está claro que Galileo continúe en esta etapa, como pretende Koyré, la dinámica de los nominalistas parisienses del siglo XIV que parecen haberse situado en una línea más aristotélica.

El segundo trabajo publicado en los *Estudios* lleva el título de *La ley de la caída de los cuerpos. Descartes y Galileo* (págs. 73-148). Se trata de un problema de larga tradición medieval y Anneliese Maier demostró, en 1949, que la fórmula moderna $e = 1/2a\,t^2$ era indirectamente conocida por los filósofos del Merton College desde 1335, por más que no está, en absoluto, claro el posible vínculo entre los mertonianos, por una parte, y Galileo o Descartes-Beeckman por otra. La historia del problema en el período comprendido entre los siglos XIV y XVI ha sido revisada en fecha no muy lejana (1968) por Wallace, quien demuestra que Domingo de Soto (1492-1560) fue el primero en aplicar a la caída de los graves la expresión *uniformiter difformis,* que debe entenderse como "uniformemente acelerado". En cualquier caso, el interés de Galileo por el tema parece haberse suscitado en 1602 y, en 1604, formula, de modo erróneo, su primera ley de la caída, de acuerdo con la cual la velocidad del grave es proporcional al espacio recorrido. Resulta curioso señalar que un error semejante es cometido por Descartes al ser consultado por Beeckmann acerca de la cuestión y que, por su parte, este último dará a conocer la ley correcta en 1619 aunque sin reivindicarla como descubrimiento propio, sino considerándola análoga a la formulación cartesiana. Si en la etapa anterior la física galileana era aún básicamente medieval, entramos ya aquí en el período de formación de la física clásica: Galileo abandona la teoría del *impetus* aunque siga utilizando este término (al menos esto sostiene Koyré frente a la postura de Duhem), se conoce el principio de la conservación del movimiento aunque no la ley de inercia y empieza a surgir, en este contexto, la preocupación por saber qué es la gravedad (Beeckmann parte de la noción de Gilbert, quien asimila la gravedad al magnetismo; Galileo es consciente de la dificultad que existe en dar un contenido real a términos como gravedad o pesantez).

La tercera y última parte del libro está constituida por el largo trabajo titulado *Galileo y la ley de inercia* (págs. 149-327). Aquí, más que nunca, Koyré se muestra partidario de la idea según la cual los grandes progresos de la revolución científica no serían tanto el resultado de las aportaciones geniales de los grandes hombres, sino más bien la cristalización de un largo proceso que alcanza su crisis en un momento determinado de la historia. Si en 1644 Descartes formula de manera clara y definitiva la ley de inercia, este principio no constituye, en su tiempo, una novedad revolucionaria, sino que se acepta como la formulación natural de una idea que flotaba en el ambiente. Ya en 1937 Shlomo Pines llamó la atención sobre una cita de Avicena que Koyré no parece conocer: "Si el movimiento violento de un proyectil es producido por una fuerza que opera en el vacío, debe persistir y no aniquilarse ni interrumpirse de ningún modo". No resulta difícil traer a colación formulaciones similares que pueden considerarse premonitorias del principio de conservación del movimiento o del de inercia. Si bien no es este el planteamiento específico de Koyré, este autor explica los orígenes de la ley de inercia como resultado de un análisis de la problemática física de la revolución copernicana. ¿Cómo responder a los argumentos aristotélicos en contra de la rotación de la tierra? Se trata de argumentos de la siguiente índole: si la tierra se moviera, un cuerpo lanzado desde lo alto de una torre no podría caer al pie de ésta. A este respecto Koyré analiza los planteamientos, por una parte de Tycho Brahe (opuesto al movimiento de la tierra), y, por otra, de Giordano Bruno (introductor de la noción de *sistema físico*), de Kepler (que acuñó el término *inercia* pero lo concibió como resistencia del grave al movimiento y tendencia del mismo al reposo) y del propio Galileo. Si este último nunca formuló explícitamente la ley de inercia (ésta es una de las grandes aportaciones de esta monografía de Koyré), su física estaba plenamente impregnada de este principio, que aparece, de manera aún más clara, en la obra de sus discípulos Cavalieri, Torricelli y Gassendi. La idea estaba, pues, madura para que la formulara Descartes en 1644.

Tras esta rápida revisión de los *Estudios Galileanos,* podemos intentar sacar algunas conclusiones: en primer lugar el libro ha resistido bien el paso del tiempo. Las tres monografías que contiene siguen siendo modelos de buena historiografía científica. La clara mentalidad filosófica del autor viene a cuento dada la temática que analiza: nos encontramos en una etapa dentro de la historia de la física en la que esta disciplina ha realizado, apenas, la ruptura del cordón umbilical que la unió a la filosofía a lo largo de la Antigüedad y de la Edad Media. Por otra parte, sigue siendo modélico el rigor metodológico de Koyré al dejar, siempre que puede, hablar a las fuentes: no hay más que considerar los largos pasajes de Galileo u otros autores que aparecen citados en el texto o en las notas del libro.

Quisiera, por último, llamar la atención sobre algunas ideas clave del libro. He señalado ya dos de ellas: la física de Galileo se sitúa en el seno de una tradición de signo platónico o arquimédeo que intenta matematizar esta disciplina; por otra parte he indicado ya que Koyré realiza un serio intento de suprimir el "culto a la personalidad" en la historia de la revolución científica y concibe ésta, más bien, como el resultado de la cristalización de un determinado ambiente. Esta actitud de Koyré hubiese sido aún más saludable si hubiera tenido más en cuenta (como hizo Duhem) el peso de la tradición medieval. Un tercer aspecto puede resultar más discutible: Koyré cree que se ha dado un peso excesivo al papel de la experiencia en los orígenes de la física clásica, al menos en lo que respecta a Galileo. Para Koyré, buena parte de los experimentos a los que alude el físico italiano son puramente mentales: sería el caso, según Koyré, de la famosa experiencia de la torre de Pisa y de las que se han atribuido a Galileo con planos inclinados. El caso más claro está constituido por el experimento del navío: los aristotélicos contemporáneos de Galileo afirmaban que, si un navío estaba inmóvil, la piedra lanzada desde lo alto de su mástil caería al pie del mismo, mientras que, si el barco se movía, la piedra caería lejos de esta base. Galileo afirma que nadie acometió esta experiencia y que, de hecho, esta resulta innecesaria ya que puede llegarse, con el simple razonamiento, a conclusiones firmes que invalidan las afirmaciones aristotélicas. No obstante, Gassendi no pudo evitar el realizar la experiencia en 1641 en Marsella y confirmó plenamente el razonamiento teórico de Galileo. (J. S.)

MANUAL DE INMUNOPATOLOGIA, por B. Jacotot, Ph. Reinert, F. Reyes, A. Sobel, R. Sylvestre. Editorial Toray-Masson. Barcelona, 1980. El gran desarrollo que han adquirido las diversas disciplinas médicas impide que un solo autor abarque el campo de extensión de cualquiera de ellas. Ello explica que, cada vez con mayor frecuencia, lleguen a nuestras manos libros cuyos capítulos están escritos por autores distintos. En contrapartida, puede caerse en una falta de ligazón entre

unos capítulos y otros y en una ausencia de directriz intelectual que permita seguir un hilo conceptual en el curso de la lectura. No podemos decir que ambos peligros se hayan salvado en este manual de inmunopatología.

El libro cubre prácticamente todos los aspectos de la inmunopatología. Los autores no son investigadores, según se colige de la forma esquemática en que exponen los conceptos sobre las diversas enfermedades con componentes inmunológicos. En ningún momento hacen un juicio crítico de las ideas ni exponen los datos que han conducido a establecer las diferentes hipótesis o conclusiones. Así, por ejemplo, se incluye una clasificación de las anemias hemolíticas autoinmunes muy discutida hoy. Se exponen los estados de hipersensibilidad sin clarificar lo que se entiende por estos términos, ni establecer su relación con los procesos inmunopatológicos. Tampoco se valora la limitación de la clasificación de Gell y Coombs de las reacciones de hipersensibilidad, ni se explica la relación que tiene con los diversos mecanismos etiopatogénicos inmunológicos. Llama también la atención cómo enfermedades de dudosa etiología (esclerosis múltiple, hemosiderosis, encefalitis subaguda,...) se las cataloga como debidas a trastornos inmunológicos. Se observa, además, una gran falta de rigor cuando, al hablar de la inmunopotenciación, se enumera una serie de sustancias que si bien poseen una determinada acción *in vitro,* no está clara su capacidad de potenciar el sistema inmunológico *in vivo*. Querer abarcar toda la inmunopatología en un breve manual lleva consigo el caer en simplificaciones que son útiles como guía, pero que no permiten tener una idea exacta del nivel de conocimientos que se posee sobre las enfermedades que cursan con trastornos inmunológicos. (J. V.)

DARWIN. LA EXPEDICION EN EL BEAGLE, (1831-1836), por Alan Moorehead. Ediciones del Serbal. Barcelona, 1980. El lector hispano no había tenido, hasta el presente, mucha oportunidad de conocer al Darwin naturalista de campo y narrador de viajes (recuerdo, aunque no pretendo ser exhaustivo, una versión reducida o "antológica" de *Viaje de un naturalista,* Salvat-Alianza Editorial, 1972, y *Charles Darwin: Autobiografía y cartas escogidas,* Alianza Editorial, 1977). También es cierto que el lector hispano no había tenido oportunidad de leer casi nada relacionado con la historia de la ciencia o con la exploración científica.

La ciencia sigue siendo para el hombre de la calle una especie de saco misterioso y cerrado dentro del cual unos hombrecillos maniáticos y apartados del mundo inventan teorías que los autojustifican, realizan experimentos extravagantes o incomprensibles y hablan en una jerga ininteligible. El hombre de la calle tiene razón, en parte. Pero, sacad al hombrecillo del saco, dejadlo vagar por el mundo y transportar su ciencia a cuestas, y ya no habrá quien se crea que es un científico ("Ah! pero si éstos son naturalistas!"). Esta miopía se le puede perdonar al hombre de la calle, que lee poco o nada y, en todo caso, no lee ciencia; pero no a los responsables de la política cultural y científica de una nación, que al respecto podrían calificarse de absolutamente cegatos.

Esta digresión viene a cuento de que, a quien tiene la vaga impresión de que la ciencia es algo que se fragua entre las paredes de un laboratorio y no entre el frontal, el occipital y los parietales, entre otros huesos y menudencias del científico, se le antoja que la historia de la ciencia no tiene interés ni aliciente alguno, y que la vida del hombre de ciencia es gris, monótona e indigna de ser escrita, por no decir leída. Nada más falso. Y el libro de Moorehead es la mejor prueba de ello.

"Después de haber sido rechazados por dos veces por fuertes temporales del sudoeste, el buque de Su Majestad *Beagle,* un bergantín de diez cañones al mando del capitán Fitz Roy, R. N., se dio a la vela desde Devonport el día 27 de diciembre de 1831." Así inicia Charles Darwin el primer capítulo de *The Voyage of the Beagle,* y así dio comienzo hace exactamente siglo y medio la aventura más importante para la biología moderna y para la comprensión del mundo vivo (y del hombre) por el hombre.

Durante la expedición, cuyo objeto era "... completar la cartografía de Patagonia y Tierra del Fuego... y realizar una serie de mediciones cronométricas en todo el mundo", el carácter de Darwin se transformó desde el propio de un joven *bon vivant* al del naturalista maduro, y su complexión física desde la de un muchacho endeble a la de un rudo explorador. Pero, sobre todo, en su mente empezó a tomar forma una idea tan grande y tan revolucionaria que tuvieron que transcurrir más de 25 años para que el insigne naturalista se atreviera a publicarla en *The Origin of Species* (1859).

Las peripecias del viaje, el afán de conocer y la curiosidad del joven científico inglés (1809-1882), la descripción de los variopintos, exóticos y, en buena parte, vírgenes paisajes que éste recorrió, y, sobre todo, el retrato humano de Darwin y el nacimiento de la incipiente idea del cambio, de la evolución de las especies, configuran uno de los más atractivos y apasionantes relatos de aventuras que jamás se haya escrito. Alan Moorehead ha sabido imprimir al texto de su libro toda la fuerza que la aventura de Darwin merece.

Basándose en varios libros del propio Darwin (en especial los citados), de Fitz Roy y de sus biógrafos y contempóraneos, Moorehead escribió el libro que nos ocupa como un subproducto del guión de un filme sobre el viaje del *Beagle.* (Incidentalmente, *The Darwin Adventure,* el filme en cuestión, fue emitido por TVE hace algunos años; su evidente calidad, muy superior a la media de los filmes televisados en España, y el carácter de documental a la vez que de biografía no impidieron que pasara sin pena ni gloria por la pequeña pantalla y por las páginas de crítica cinematográfica y televisiva de la prensa. Ya he comentado lo que le importa la ciencia al hombre de la calle.)

Como para competir con las imágenes del celuloide, el libro que nos ocupa "entra por los ojos". Alrededor de dos centenares de ilustraciones, en blanco y negro y en color, enriquecen con una fuerza y una belleza pocas veces alcanzadas un texto ya de por sí apasionante. Muchas de las ilustraciones son de Earle y Martens, dos artistas de la expedición; otras de Fitz Roy, y las más reproducen grabados y láminas de las monografías de los principales naturalistas de la época. (Darwin se lamenta repetidamente en sus escritos de su incapacidad de dibujar.)

El relato mezcla hábilmente los acontecimientos más destacados de los cinco años del viaje; las sensaciones del joven inglés ante un mundo nuevo (sus plantas, sus rocas y sus animales, pero también sus hombres... y sus mujeres: "Nuestra principal diversión era pasear y admirar las mujeres españolas"; o sus esclavos: "nunca volveré a visitar un país esclavista"); las interminables discusiones con el fanático Fitz Roy, para el que la Biblia era la respuesta a todos los interrogantes que Darwin se planteaba ante cada nuevo descubrimiento y para quien, desde luego, el mundo era inmutable y la idea de evolución una herejía (los fósiles de mamíferos actualmente extinguidos que Darwin exhumó en Argentina no eran, a los ojos del capitán del *Beagle,* más que la prueba del Diluvio Universal: no todos los animales habrían conseguido embarcar en el Arca de Noé); la añoranza del hogar y de la patria:

("Confieso que nunca veo zarpar un buque mercante hacia Inglaterra sin una tentación muy peligrosa de huir... Estoy convencido y seguro de que el paisaje de Inglaterra es diez veces más hermoso que cualquier de los que hemos visto... Tengo una añoranza constante"). Y las cartas a Henslow, protector de Darwin y artífice de la participación de éste en el viaje, que revelan los primeros asombros ante la naturaleza y sus múltiples manifestaciones insólitas, del mismo modo que las cartas a sus familiares, en especial a su prima Emma Wedgwood, con la que habría de casarse a su regreso, descubren la intimidad de los sentimientos del expedicionario.

El viaje (que estuvo a punto de no comenzar para Darwin, debido a la tenaz oposición inicial de su padre) empezó como él mismo nos relata. Bien pertrechado (libros de historia natural, cuadernos en los que escribir sus impresiones, ropa abundante, un microscopio y... armas), Darwin se embarcó muy animado, sólo para sentir los primeros reveses ("El sufrimiento que me produce el mareo va más allá de todo lo que imaginé") y desilusiones (no pudieron desembarcar en Tenerife por temor al cólera) del viaje. Nunca sabremos si las islas Afortunadas hubieran despertado en Darwin las primeras ideas de la teoría de la evolución, que todos sus biógrafos están de acuerdo en que no se manifestaron hasta que puso pie en las islas Galápagos.

Después de un interludio en diversas islas e islotes del Atlántico, la grandeza del bosque tropical amazónico sorprendió a Darwin, y amó la selva con la misma intensidad con que aborreció a los brasileños por sus prácticas esclavistas. Esta dualidad del hombre que se extasiaba ante los prodigios de la naturaleza al tiempo que abominaba las atrocidades de los hombres debieron de hacer parecer al inglés ("Don Carlos Darwin") un personaje extravagante en las colonias americanas. En vano recriminaba a los soldados argentinos del general Rosas que, por lo menos, respetaran la vida de las mujeres en las continuas masacres que suponía su lucha con los levantiscos indios. "No puede ser; crían muy rápido."

Cuando advirtió que los fueguinos "civilizados" que, después de pasar algún tiempo en Inglaterra habían sido devueltos por Fitz Roy a su tribu, habían perdido, en un año, cualquier vestigio de cultura para volver a su primitivo estado salvaje y embrutecido, comprendió que no se puede interferir en la evolución de las culturas primitivas, y sus comentarios posteriores a propósito de los indios de Norteamérica, de los aborígenes australianos, de los fijianos, etc., giran en torno a la belleza y sencillez de sus vidas y de los estragos que la "civilización" hace en las culturas primitivas. ("Sería difícil encontrar en Europa un grupo de personas con rostros la mitad de felices y alegres". "Hay una dulzura de expresión en sus semblantes que en seguida destierra la imagen del salvaje".)

Una de las experiencias más terroríficas de Darwin fue la de un terremoto catastrófico, cuyo epicentro se situó en Concepción pero que se hizo notar incluso en Valdivia, donde se encontraba el naturalista. Las fuerzas telúricas desatadas hicieron tabla rasa de buena parte del Chile costero, y sin duda dejaron sentir asimismo su influencia en el Darwin geólogo.

Desde el cono austral de Sudamérica, el viaje de retorno, después de casi cuatro años de exploraciones marítimas y por tierra, llevó al *Beagle* a las islas Galápagos. Aunque escéptico al principio (como casi todos los naturalistas de su época) ante la idea de una evolución de las especies, los gigantescos huesos fósiles de Punta Alta, en Bahía Blanca, primero, y la distribución y adaptaciones de las especies de las Galápagos, después, influyeron enormemente en el naturalista. Le sorprendían en especial las ligeras diferencias entre especies muy afines propias de distintas islas del archipiélago. Era tentador suponer que en cada isla habían evolucionado sus propias variedades, a partir de antepasados llegados del continente. La idea de una creación simultánea le parecía a Darwin cada vez más absurda.

En sus propias palabras, "Aquí, tanto en el espacio como en el tiempo, tenemos la sensación de que estamos algo más cerca de este gran acontecimiento... que es la aparición de nuevos seres sobre la Tierra". Las trece variedades de pinzones de estas islas, algunas con picos enormes y otras con picos pequeños o bien de tamaño intermedio, formaban una gradación casi continua. "Viendo esta gradación y la diversidad de estructura en un grupo de aves reducido y de especies íntimamente emparentadas, se puede realmente imaginar que a partir de una pobreza inicial de aves en este archipiélago, una única especie se hubiera modificado con fines diversos." "Era evidente que hechos como estos, así como otros muchos, sólo podían explicarse suponiendo que las especies se modifican de forma gradual"; es decir, evolucionan.

Posteriormente, las islas del Pacífico, Nueva Zelanda, Australia y el cabo de Buena Esperanza; el ansia del regreso parece nublar el sentido crítico del naturalista: las gentes siguen siendo amables y sencillas, pero los paisajes han perdido su encanto. Las islas coralinas y los atolones son explicados de manera plausible, por primera vez, por Darwin. De nuevo las islas atlánticas, Brasil e Inglaterra, tras cinco años de viaje.

El *Journal,* publicado en el año 1839, se convierte en un *best-seller,* como anuncio de lo que será *The Origin of Species,* obra en la que empieza a trabajar en 1837 y que sólo a instancias de Lyell y Hooker, y para no quedar rezagado con respecto a A. R. Wallace (que había llegado a conclusiones similares), se atrevió a publicar mucho más tarde. Pero ésta es otra historia: la de un hombre maduro, enfermizo, sedentario, que en nada se parece al Darwin del *Beagle.*

La edición española del libro de Moorehead ha sabido conservar tanto la gracia y viveza del texto (en una traducción muy correcta) como la belleza de las ilustraciones; algunos errores tipográficos mínimos parecen ser más fruto de los apresuramientos de última hora (éste es el primer libro de una nueva editorial, que desde aquí saludo, así como de una serie, "Libros del buen andar", de la que espero con ansiedad el próximo volumen) que del descuido propio de muchas ediciones actuales. No creo que valga la pena enumerar los contados "gazapos" que he advertido; el lector que ya haya leído el libro los habrá descubierto asimismo, y creo poder augurar que el que adquiera el volumen después de leer este comentario no los notará, pues con probabilidad estará ya en la calle la segunda edición corregida. Bienvenida sea, así como cualesquiera libros que nos recuerden (o nos descubran) la aventura de la ciencia.

Después de la expedición, y ya instalado en Londres, Darwin escribía a Fitz Roy: "A pesar del recuerdo que puedan tener los demás del viaje en el *Beagle,* ahora que los detalles desagradables están poco menos que olvidados, yo considero que es con mucho la circunstancia más afortunada de mi vida el que recayera en mí la suerte deparada por su oferta de llevar un naturalista. A menudo pasan por mi vista las más intensas y deliciosas imágenes que vi a bordo... No cambiaría estos recuerdos y lo que aprendí de historia natural ni por dos veces diez mil años". Creo poder afirmar que los que nos sentimos un poco naturalistas a la vieja usanza no cambiaríamos la emoción de revivir la expedición del *Beagle* por la que proporciona la lectura de ninguna obra de ficción. (J.-D. R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabjos siguientes:

POLIMEROS INORGANICOS

LINEAR POLYMERS WITH PHOSPHORUS AND CARBON IN THE MAIN CHAIN. M. Sander y E. Steininger en *Reviews in Macromolecular Chemistry,* vol. 2, págs. 91-178, 1967.

INORGANIC POLYMERS. David L. Venezky en *Encyclopedia of Polymer Science and Technology,* vol. 7, págs. 664-691, 1967.

INORGANIC POLYMERS. I. SYNTHESIS AND PROPERTIES OF SOME POLYAMINOPYRIDINIUM MOLYBDATES. Issa Katime, Pedro Gili y Pascual Polo en *Polymer Bulletin,* 1, 509, 1979.

EL CULTIVO DEL ARROZ EN CALIFORNIA

RICE IN CALIFORNIA. Dirigido por Jack H. Wilson. Butte County Rice Growers Association, P. O. Box 128, Richvale, California 95974, 1979.

U.S. RICE INDUSTRY. Shelby H. Holder, Jr., y Warren R. Grant. División de Análisis Económico Nacional de los Servicios de Agricultura, Economía, Estadística y Cooperativos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Informe de Economía Agrícola n.º 433, 1979.

RICE–PRODUCTION AND UTILIZATION. Dirigido por Bor S. Luh. The Avi Publishing Company, 1980.

EL NUCLEOSOMA

CHROMATIN STRUCTURE: A REPEATING UNIT OF HISTONES AND DNA. Roger D. Kornberg en *Science,* vol. 184, n.º 4139, págs. 868-871; 24 de mayo de 1974.

AN OCTAMER OF HISTONES IN CHROMATIN AND FREE IN SOLUTION. Roger D. Kornberg y Jean O. Thomas en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 72, n.º 7, págs. 2626-2630; julio, 1975.

STRUCTURE OF NUCLEOSOME CORE PARTICLES OF CHROMATIN. J. T. Finch, L. C. Lutter, D. Rhodes, R. S. Brown, B. Rushton, M. Levitt y A. Klug en *Nature,* vol. 269, n.º 5623, págs. 29-36; 1 de septiembre de 1977.

CHROMATIN. Gary Felsenfeld en *Nature,* vol. 271, n.º 5641, págs. 115-122; 12 de enero de 1978.

INVOLVEMENT OF HISTONE H1 IN THE ORGANIZATION OF THE NUCLEOSOME AND OF THE SALT-DEPENDENT SUPERSTRUCTURES OF CHROMATIN. F. Thoma, Theo Koller y A. Klug en *The Journal of Cell Biology,* vol. 83, n.º 2, 1.ª parte, págs. 403-427; noviembre, 1979.

ENFERMEDADES POR AUTOINMUNIDAD

RECENT OBSERVATIONS AND CONCEPTS IN IMMUNOLOGICAL UNRESPONSIVENESS AND AUTOIMMUNITY. W. O. Weigle en *Clinical and Experimental Immunology,* vol. 9, n.º 4, octubre, 1971.

AUTO-IMMUNITY AND AUTO-IMMUNE DISEASE: A SURVEY FOR PHYSICIAN OR BIOLOGIST. F. MacFarlane Burnet. F. A. Davis Company, 1972.

AUTOIMMUNITY AND SELF-NONSELF DISCRIMINATION. *Transplantation Reviews,* vol. 31, págs. 1-2851, 1976.

AUTOIMMUNITY: GENETIC, IMMUNOLOGIC AND CLINICAL ASPECTS. Dirigido por Norman Talal. Academic Press, Inc., 1977.

MODELS OF AUTOIMMUNE DISEASES. *Immunological Reviews,* en prensa.

LOS CICLOS DE ACTIVIDAD DE LAS ESTRELLAS

THE QUIET SUN. Edward G. Gibson. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office, 1973.

FLUX MEASUREMENTS OF CA II H AND K EMISSION. Arthur H. Vaughan, George W. Preston y Olin C. Wilson en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific,* vol. 90, n.º 535, págs. 267-274; junio-julio, 1978.

CHROMOSPHERIC VARIATIONS IN MAIN-SEQUENCE STARS. O. C. Wilson en *The Astrophysical Journal,* vol. 226, n.º 2, 1.ª parte, págs. 379-396; diciembre, 1978.

PTEROSAURIOS

AERODYNAMICS OF THE LONG PTEROSAUR WING. J. H. McMasters en *Science,* vol. 191, n.º 4230, pág. 899; 5 de marzo de 1976.

AERODYNAMICS OF THE LONG PTEROSAUR WING. Ross S. Stein en *Science,* vol. 191, n.º 4230, págs. 898-899; 5 de marzo de 1976.

PTEROSAURIA. Peter Wellnhofer en *Handbuch der Paläoherpetology.* Gustav Fischer Verlag, 1978.

UN TELESCOPIO DE NEUTRINOS EN LAS PROFUNDIDADES MARINAS

PROCEEDINGS OF THE 1976 DUMAND SUMMER WORKSHOP IN HAWAII. Dirigido por A. Roberts. Fermilab, 1977.

PROCEEDINGS OF THE 1978 DUMAND SUMMER WORKSHOP, LA JOLLA. Dirigido por A. Roberts. DUMAND Scripps Institution of Oceanography, 1979.

PROCEEDINGS OF THE 1979 DUMAND SUMMER WORKSHOPS AT KHABAROVSK AND LAKE BAIKAL. Dirigido por J. G. Learned. Hawaii DUMAND Center, Universidad de Hawai, 1980.

LAS ESCULTURAS NOK DE NIGERIA

THE NOK CULTURE IN PREHISTORY. Bernard E. B. Fagg en *Journal of the Historical Society of Nigeria,* vol. 1, n.º 4, págs. 288-293; 1959.

A PRELIMINARY REPORT ON AN OCCUPATION SITE IN THE NOK VALLEY, NIGERIA: SAMUN DUKIYA AF/70/1. Angela Fagg en *West African Journal of Archaeology,* vol. 2, págs. 75-79; 1972.

NOK TERRACOTTAS. Bernard E. B. Fagg. Ethnographica for the National Museum, Lagos, 1977.

NIGERIA: ITS ARCHAEOLOGY AND EARLY HISTORY. Thurstan Shaw. Thames and Hudson, 1978.

JUEGOS MATEMATICOS

NUMBER THEORY AND ITS HISTORY. Oystein Ore. McGraw-Hill Book Company, 1948.

TEN DIVISIONS LEAD TO EASTER. T. H. O'Beirne en *Puzzles and Paradoxes.* Oxford University Press, 1965.

A NEW LOOK AT FUNCTIONS IN MODULAR ARITHMETIC. Marion H. Bird en *The Mathematical Gazette,* vol. 64, n.º 428, págs. 78-86; junio, 1980.

TALLER Y LABORATORIO

STANDARD METHODS OF CHEMICAL ANALYSIS. Wilfred W. Scott. D. Van Nostrand Company, 1939.

MICROANALYSIS BY THE RING OVEN TECHNIQUE. Herbert Weisz. Pergamon Press, 1961.

SPOT TESTS IN INORGANIC ANALYSIS. Fritz Feigl y Vinzenz Anger. Elsevier Publishing Company, 1971.